

Sustentabilidad de la cañicultura en el NO Argentino: análisis de las dinámicas del agua y la energía.

Darío Ernesto Rivero
Ingeniero Agrónomo
(Universidad de Buenos Aires, 2004)

*Tesis presentada para optar al título de
Magister de la Universidad de Buenos Aires, área Recursos Naturales*

*Escuela para graduados Ing. Agr. Alberto Soriano.
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires*



COMITE CONSEJERO

CONSEJERO PRINCIPAL:

Claudio Marco Ghera

Ingeniero Agrónomo (UBA)

CONSEJERO:

Diego Omar Ferraro

Ingeniero Agrónomo (UBA)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (UBA)

JURADO DE TESIS

Presidente:

Claudio Marco Ghera

Ingeniero Agrónomo (UBA)

Miembro:

Roberto Alvarez

Ingeniero Agrónomo (UBA)

Miembro:

Marcelo Daniel Nosetto

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (UBA)

Fecha de aprobación de la tesis

11 de junio de 2014

Dedicatoria

A Claudio Ghera.

A mis papás, Mario y Liliana, y a mis hermanas, Marina y Silvina. A mis abuelos.

A Sonia y a nuestros retoños, Tomi y Mati.

Agradecimientos

A Ledesma SAAI, particularmente a Juan Carlos Mirande, Sergio Fadda, Miguel Ulibarri y Ricardo Castellanos. Al IFEVA. Al LART. A Claudio Ghera y Diego Ferraro. A Enrique Chaneton y Susana Perelman. A Julián Cámara Hernández, Ana María Miente Alsogaray y Marcelo Bordas. A Adelia González Arzac, Andrés Grasso, Esteban Fernández, Florencia Rositano, Gastón Oñatibia, Guillermo Correa Tedesco, Guillermo García Martínez, Gonzalo Grigera, Gonzalo Irisarri, Gonzalo Molina, Iván Niveyro, Jennifer Landesman, Laura Martínez, Lucas Garibaldi, Mariano Sposaro, Marta Telesnicki, Mirta Tinaro, Nicolás Gualano, Patricia Araujo, Patricio Grassini, Pedro Gundel, Romina Cavagnaro, Rosa Mendoza, Santiago Zervino, Victoria Marchesini, Walter Tanaka.

A los jurados, por sus constructivos comentarios y correcciones.

A mi familia

DECLARACION

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que esta material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

Darío Ernesto Rivero

INDICE GENERAL

Capítulo 1. <i>Introducción general</i>	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos.....	6
Capítulo 2. <i>Estimación de la transpiración de caña de azúcar en la provincia de Jujuy</i>	8
2.1. Introducción.....	9
2.2. Materiales y métodos.....	10
2.2.1. Zona de estudio y manejo del cultivo.....	10
2.2.2. Descripción de la base de datos.....	11
2.2.3. Parámetros meteorológicos y evapotranspiración de referencia (ET_0).....	11
2.2.4. Coeficiente basal de cultivo (K_{cb}).....	12
2.2.5. Parametrización de la relación entre el K_{cb} y el IVN para el cultivo de caña de azúcar.....	13
2.2.6. Evaluación del modelo parametrizado.....	14
2.2.7. Análisis de los resultados.....	15
2.3. Resultados.....	15
2.4. Discusión.....	19
2.5. Conclusiones.....	21
Capítulo 3. <i>Relaciones entre las estrategias de manejo y la transpiración</i>	22
3.1. Introducción.....	23
3.2. Materiales y métodos.....	24
3.2.1. Zona de estudio y manejo del cultivo.....	24
3.2.2. Descripción de la base de datos y de los parámetros meteorológicos.....	24
3.2.3. Estimación de la transpiración.....	24
3.2.4. Análisis de los resultados.....	25
3.3. Resultados.....	27
3.4. Discusión.....	31
3.5. Conclusiones.....	34
Capítulo 4. <i>Factores que afectan la eficiencia del uso del agua (EUA) y de la radiación (EUR) en sistemas de producción de caña de azúcar</i>	35
4.1. Introducción.....	36
4.2. Materiales y métodos.....	37
4.2.1. Estimación de la eficiencia en el uso del agua (EUA).....	37
4.2.2. Estimación de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR).....	37
4.2.3. Análisis de los datos.....	38
4.3. Resultados.....	40
4.3.1. Eficiencia en el uso del agua.....	40
4.3.2. Eficiencia en el uso de la radiación.....	45
4.4. Discusión.....	50
4.5. Conclusiones.....	55
Capítulo 5. <i>Sustentabilidad ecológica de los sistemas de producción intensivos de caña de azúcar del NO argentino: análisis centrado en las dinámicas del agua y la energía en los ecosistemas</i>	56
5.1. Introducción.....	57

5.2. Materiales y métodos.....	58
5.3. Resultados.....	59
5.3.1. Eficiencias en el uso del agua (<i>EUA</i>) y de la radiación (<i>EUR</i>)	59
5.3.2. Transpiración del cultivo (<i>t</i>) y su relación con el agua total disponible (<i>t/ATD</i>).....	60
5.4. Discusión.....	61
5.4.1. Eficiencias en el uso del agua (<i>EUA</i>) y de la radiación (<i>EUR</i>)	61
5.4.2. Transpiración del cultivo (<i>t</i>) y su relación con el agua total disponible (<i>t/ATD</i>).....	64
5.5. Conclusiones.....	67
Capítulo 6. Consideraciones finales.....	69
Bibliografía.....	72

INDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1. Respuesta del K_{cb} ante cambios en el valor del IVN de caña de azúcar. En a) se presentan los valores obtenidos en base al modelo 1 (círculos), 2 (triángulos) y 3 (cuadrados). Las líneas punteadas representan los límites inferior y superior del K_{cb} impuestos para los tres modelos. En b) se presentan el promedio (círculos), el desvío estándar (triángulos) y el coeficiente de variación (cuadrados) resultantes del uso de los tres modelos. Las barras representan la frecuencia relativa de las distintas clases de IVN .
.....16
- Figura 2.2. Dinámica temporal de la transpiración diaria (mm día^{-1}) (promedio, desvío estándar y coeficiente de variación), de la ET_0 y del IVN de una cultivo en el estadio soca 2 bajo riego (8 eventos por ciclo). Ciclo: 12/7/2002 - 11/06/2003. DDP corresponde a “días después de la plantación”.....17
- Figura 2.3. Regresión lineal entre las estimaciones de transpiración anual realizadas con los modelos: 1 y 2 (a), 1 y 3 (b) y 2 y 3 (c). Las líneas representan la recta 1:1, la recta de mejor ajuste y las bandas de confianza del 99% (líneas punteadas). Cada punto ($n=240$) representa el par de estimaciones realizadas con los dos modelos correspondientes, en un mismo lote y para una misma campaña.....18
- Figura 2.4. Distribución de frecuencias para las diferencias de transpiración (mm ciclo^{-1}) ocasionadas por el uso de los distintos modelos (comparación modelos: 1-2, barras con rayas horizontales; 1-3, barras cuadrículadas; 2-3, barras con rayas oblicuas; barras negras, análisis reuniendo datos de las tres comparaciones), agrupadas en seis categorías. Los números sobre las barras indican la frecuencia acumulada.....19
- Figura 3.1. Arbol de clasificación obtenido para los datos de transpiración del cañaveral. En cada nodo (intermedios recuadrados con línea continua, terminales recuadrados con línea punteada) se indica el número identificador (vértice superior izquierdo), la cantidad de parcelas que lo representan (vértice superior derecho) y la transpiración media (mm ciclo^{-1} , centro del nodo). Para cada nodo intermedio se presenta el criterio de clasificación, mientras que “sí” y “no” representan la agrupación de los registros según cumplan (o no) con ésta condición. Los gráficos de la derecha representan para cada nivel de clasificación la transpiración (promedio \pm 1 desvío estandar) de los nodos madre y de los nodos hijos resultantes (un asterisco identifica a los nodos terminales).....28
- Figura 3.2. Ranking de importancia de las ocho variables que intervienen en la construcción del árbol de clasificación.....29
- Figura 3.3. a) Transpiración total (mm ciclo^{-1}) en función de la longitud del ciclo de cultivo de caña ($n=231$). Modelo calibrado: $y = 3.131 * x$ ($R^2 = 0,4123$, error estándar de la pendiente 0,025). b) Transpiración total promedio (\pm 1 EE) (mm ciclo^{-1}) en función del mes de inicio del ciclo de cultivo. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, Welch ANOVA).....29
- Figura 3.4.a) Transpiración total promedio (\pm 1 EE) (mm ciclo^{-1}) estimada para las zafas 2002, 2003, 2004 y 2005. Letras distintas indican diferencias significativas

($p < 0,01$, Welch ANOVA). b) Transpiración total (mm ciclo^{-1}) en función de la variedad de caña cultivada. Para cada variedad, la caja muestra la mediana y ambos cuartiles inferior y superior, mientras que los bigotes muestran los valores mínimo y máximo. Las variedades son: 1 CP 68 350; 2 CP 70 1133; 7 NA 84 3920; 8 NA 85 1602; 10 TUC 77 42.....30

Figura 3.5. a) Transpiración total del cañaveral (mm ciclo^{-1}) en función de la cantidad de eventos de riego invernal aportados durante el ciclo de cultivo. b) Cociente entre la transpiración total y el agua total disponible (*ATD*) para el cultivo en función de la cantidad de eventos de riego invernal. En ambos gráficos, las cajas muestran la mediana y ambos cuartiles inferior y superior, mientras que los bigotes representan los valores mínimo y máximo.....31

Figura 4.1. Análisis de la respuesta del rendimiento de caña (t ha^{-1}) ante cambios en la cantidad de agua transpirada por el cultivo (mm ciclo^{-1}) ($n=214$). Las ecuaciones que describen a las rectas de los tres percentiles son: P 5 $y = 0,048 \bullet X$; P 50 $y = 0,077 \bullet X$; P 95 $y = 0,115 \bullet X$40

Figura 4.2. Arbol de clasificación obtenido para los datos de *EUA* del cañaveral ($n=214$). En cada nodo (intermedios recuadrados con línea continua, terminales recuadrados con línea discontinua) se indica el número identificador (vértice superior izquierdo), la cantidad de parcelas que lo representan (vértice superior derecho) y la *EUA* media (kg m^{-3} , centro del nodo). Para cada nodo intermedio se presenta el criterio de clasificación (variable presentada debajo del recuadro del nodo respectivo), y los niveles de dicha variable que caracterizan a los nodos hijos. Los gráficos de la derecha representan para cada nivel de clasificación la *EUA* (promedio \pm 1 desvío estandar) de los nodos madre y de los nodos hijos resultantes (un asterisco identifica a los nodos terminales).....41

Figura 4.3. Ranking de la importancia que ejercen las ocho variables que intervienen en la construcción del árbol de clasificación.....42

Figura 4.4. Eficiencia en el uso del agua (Kg m^{-3}) en función de la variedad cultivada (a) y del mes de inicio del ciclo de cultivo (b). Para cada nivel de las variables independientes se presentan la mediana, junto con los cuartiles inferior y superior (cajas) y los valores extremos (bigotes). Las variedades son: 1 CP 68 350; 2 CP 70 1133; 7 NA 84 3920; 8 NA 85 1602; 10 TUC 77 42.....43

Figura 4.5. a) Eficiencia en el uso del agua del cañaveral (Kg m^{-3}) en función de la lámina de riego (mm) aportada durante la estación invernal ($n=214$). Las ecuaciones de las rectas son: P 5 $Y = 2,39 \times 10^{-3} \bullet X + 4,68$; P 25 $Y = -2,67 \times 10^{-4} \bullet X + 6,48$; P 50 $Y = -3,66 \times 10^{-3} \bullet X + 7,99$; P 75 $Y = -7,31 \times 10^{-3} \bullet X + 9,22$; P 95 $Y = -1,38 \times 10^{-2} \bullet X + 11,55$. b) Respuesta de la pendiente (cociente *EUA*:Riego invernal) y de la ordenada al origen ante cambios en el percentil de la *EUA* ($P/100$). Símbolos vacíos indican valores estadísticamente distintos de cero.....43

Figura 4.6. a) Análisis de regresión por cuantiles para la relación entre la *EUA* y la longitud del ciclo de cultivo ($n = 214$). Las ecuaciones de las rectas son P 5 $Y = 5,5 \times 10^{-4} \bullet X + 4,664$; P 25 $Y = -5,39 \times 10^{-3} \bullet X + 8,5$; P 50 $Y = -7,91 \times 10^{-3} \bullet X + 10,528$; P 75 $Y = -4,67 \times 10^{-3} \bullet X + 10,197$; P 95 $Y = -1,6 \times 10^{-2} \bullet X + 17,047$. b) Respuesta de la pendiente y de la ordenada al origen correspondientes a la relación del gráfico “a” ante

cambios en el percentil (P/100) de la *EUA*. Símbolos vacíos indican valores estadísticamente distintos de cero.....44

Figura 4.7. Eficiencia en el uso del agua en función de la edad del cañaveral. Para cada estadio, las cajas muestran la mediana, el cuartil inferior y el superior, mientras que los bigotes indican el valor mínimo y máximo. Letras distintas indican diferencias significativas entre medianas ($p < 0,05$, Kruskal Wallis, Dunn's post test). CP indica caña planta y S1, ..., S7 indican socas 1 a 7.....45

Figura 4.8. Análisis de la respuesta de la biomasa aérea total (g m^{-2}), expresada en base seca, ante cambios en la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo (Mj m^{-2}) ($n=214$). Las ecuaciones que describen a las rectas de los tres percentiles son: $\underline{P\ 5}$ $y = 2,04 \bullet X$; $\underline{P\ 50}$ $y = 2,90 \bullet X$; $\underline{P\ 95}$ $y = 4,18 \bullet X$45

Figura 4.9. Arbol de clasificación obtenido para los datos de la *EUR* del cañaveral ($n=214$). En cada nodo (intermedios recuadrados con línea continua, terminales recuadrados con línea discontinua) se indica el número identificador (vértice superior izquierdo), la cantidad de parcelas que lo representan (vértice superior derecho) y la *EUR* media (g MJ^{-1} , centro del nodo). Para cada nodo intermedio se presenta el criterio de clasificación (variable presentada debajo del recuadro del nodo respectivo), y los niveles de dicha variable que caracterizan a los nodos hijos. Los gráficos de la derecha representan para cada nivel de clasificación la *EUR* (promedio ± 1 desvío estandar) de los nodos madre y de los nodos hijos resultantes (los números identifican a cada nodo, un asterisco identifica a los nodos terminales).....46

Figura 4.10. Ranking de la importancia que ejercen las variables que intervienen en la construcción del árbol de clasificación.....47

Figura 4.11. a) Eficiencia en el uso de la radiación (Mj g^{-1}) en función de la variedad cultivada (las variedades son: 1 CP 68 350; 2 CP 70 1133; 7 NA 84 3920; 8 NA 85 1602; 9 TUC 72 16; 10 TUC 77 42). Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, Welch ANOVA). b) *EUR* en función de la edad del cañaveral (CP indica caña planta y S1, ..., S7 indican socas 1 a 7). Las cajas muestran la mediana, el cuartil inferior y el superior de cada estadio, mientras que los bigotes indican los valores mínimo y máximo.....48

Figura 4.12. Eficiencia en el uso de la radiación (g MJ^{-1}) (± 1 *EE*) estimada para las zafas 2002, 2003, 2004 y 2005. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, Welch ANOVA).....48

Figura 4.13. a) Eficiencia en el uso de la radiación del cañaveral (g MJ^{-1}) en función del riego invernal (lámina) aportado durante el ciclo de cultivo ($n=214$). Las ecuaciones de las rectas son $\underline{P\ 5}$ $Y = 1,74 \times 10^{-3} \bullet X + 1,73$; $\underline{P\ 25}$ $Y = 1,18 \times 10^{-3} \bullet X + 2,20$; $\underline{P\ 50}$ $Y = -1,54 \times 10^{-3} \bullet X + 2,86$; $\underline{P\ 75}$ $Y = -2,33 \times 10^{-3} \bullet X + 3,37$; $\underline{P\ 95}$ $Y = -3,11 \times 10^{-3} \bullet X + 4,18$. b) Respuesta de la pendiente (cociente *EUR*:Riego invernal) y de la ordenada al origen ante cambios en el percentil de la *EUR* (expresado como P/100). Símbolos vacíos indican valores estadísticamente distintos de cero.....49

Figura 4.14. Eficiencia en el uso de la radiación (g MJ^{-1}) en función de los meses de inicio del ciclo de cultivo (a) y de cosecha (b). Para cada nivel de las variables

independientes se presentan la mediana, junto con los cuartiles inferior y superior (cajas) y los valores extremos (bigotes).....49

Figura 4.15. a) Eficiencia en el uso de la radiación del cañaveral ($g\ Mj^{-1}$) en función de la duración del ciclo de cultivo (días) ($n=214$). Las ecuaciones de las rectas son $\underline{P\ 5}\ Y = 3,13 \times 10^{-4} \bullet X + 1,768$; $\underline{P\ 25}\ Y = -9,37 \times 10^{-4} \bullet X + 2,743$; $\underline{P\ 50}\ Y = -1,54 \times 10^{-3} \bullet X + 3,291$; $\underline{P\ 75}\ Y = -1,93 \times 10^{-3} \bullet X + 3,854$; $\underline{P\ 95}\ Y = -3,72 \times 10^{-3} \bullet X + 5,288$. b) Respuesta de la pendiente (cociente $EUR : Longitud\ de\ Ciclo$) y de la ordenada al origen ante cambios en el percentil de la EUR (expresado como $P/100$). Símbolos vacíos indican valores estadísticamente distintos de cero.....50

Figura 5.1. Valores estimados de caudal residual ($m^3\ s^{-1}$) del río San Francisco en función de la superficie irrigada (has), considerando distintos niveles de eficiencia del sistema de irrigación y los requerimientos hídricos mínimo (a) y máximo (b) del cultivo de caña de azúcar. La línea punteada corresponde al caudal de mantenimiento ($15\ m^3\ s^{-1}$)60

Figura 5.2. Cociente entre la transpiración y el agua total disponible (t / ATD) en función del ATD a lo largo del ciclo de producción.....61

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Descripción de las variables predictoras utilizadas en los árboles de clasificación.....	26
---	----

LISTADO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

AC: ascenso capilar del agua freática.
ANOVA: análisis de la varianza (*analysis of variance*).
ATD: agua total disponible.
CART: árboles de clasificación y regresión (Classification and regression trees).
C_p: coeficiente de partición transpiración- evaporación.
CP: caña planta.
CV: coeficiente de variación.
DE: desvío estándar.
D_r: desecamiento diario de la rizósfera.
E: evaporación.
EE: error estándar.
Es: escurrimiento superficial.
ET: evapotranspiración.
ET₀: evapotranspiración de referencia.
ET_c: evapotranspiración del cultivo.
ET_{c aj}: evapotranspiración bajo condiciones de estrés hídrico.
EUA: eficiencia en el uso del agua.
EUR: eficiencia en el uso de la radiación.
F_c: fracción de cobertura del suelo.
fRFA_a: fracción de la radiación fotosintéticamente activa que es absorbida por el cultivo.
G: flujo de calor del suelo.
I: agua aportada por irrigación.
IAF: índice de área foliar.
IVN: índice verde normalizado.
K_c: coeficiente del cultivo ó coeficiente único del cultivo.
K_e: coeficiente de evaporación del suelo.
K_{cb}: coeficiente basal del cultivo.
K_s: coeficiente de estrés hídrico.
MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.
NOA: noroeste argentino.
p: agua disponible antes del inicio del estrés hídrico.
P: precipitación.
P-M: Penman-Monteith.
P-T: Priestley & Taylor.
Pe: percolación profunda.
Pr: promedio.
R_b: biomasa aérea.
R_c: rendimiento de caña.
RFA: radiación fotosintéticamente activa.
RFA_a: radiación fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo.
RGP: fenómeno de reducción del crecimiento (reduced growth phenomenon).
R_n: radiación neta.
S1, S2, ..., S7: soca 1, soca 2, ..., soca 7.

SR : simple ratio.

t : transpiración.

Z_r : profundidad edáfica explorada por las raíces.

α : factor empírico de P-T.

γ : constante psicrométrica.

λ : calor latente de vaporización del agua (2,45 MJ kg⁻¹).

Δ : pendiente de la curva de presión de saturación de vapor.

θ_{CC} : contenido hídrico edáfico en capacidad de campo.

θ_{PMP} : contenido hídrico edáfico en punto de marchitez permanente.

RESUMEN

La caña de azúcar es un importante movilizador de la economía del NO argentino. Su cultivo presenta elevados requerimientos hídricos con potenciales impactos ambientales. La crisis energética incrementa la demanda de biocombustibles derivados del azúcar, con posibles aumentos del área cultivada y de sus impactos. Los antecedentes sobre el uso del agua y de la radiación en caña de azúcar involucran el efecto de unos pocos factores y son localmente escasos. El objetivo de esta tesis fue estudiar los controles de la transpiración y de la eficiencia en el uso del agua (*EUA*) y de la radiación (*EUR*) en los agroecosistemas de caña de azúcar del NO argentino, e inferir sobre la sustentabilidad ecológica y productiva. Para ello, ambas eficiencias se calcularon como el cociente entre el rendimiento de caña y la cantidad de recursos (agua o radiación) insumidos. El consumo de agua se estimó con el modelo propuesto por la FAO complementado con información satelital (índice verde normalizado, *IVN*). La radiación absorbida se estimó a partir de su relación con el *IVN*. Ambas *EUA* y *EUR* presentaron una variabilidad que abarcó todo el rango citado en la bibliografía internacional. El genotipo y la edad del cañaveral fueron los factores con mayor influencia sobre dichas eficiencias. Los requerimientos hídricos estimados superaron hasta en un 100% a los de los de los ecosistemas prístinos (yungas) y a la precipitación, y representaron una pérdida de energía superficial de hasta $72,6 \text{ W m}^{-2}$ (74,3% de la radiación de onda corta incidente). Los potenciales impactos identificados dependen de las estrategias de manejo, e incluyen: desequilibrios de la red trófica asociados al flujo de energía, alteraciones de los ríos (reducción del caudal, inundaciones luego de eventos lluviosos y contaminación), modificaciones cuali/cuantitativas de las napas, enfriamiento superficial, exportación regional de vapor de agua, entre otros. Los resultados de esta tesis permiten guiar el manejo del cultivo, minimizando la ocurrencia de dichos impactos.

Palabras clave: *Saccharum*, eficiencia en el uso del agua, eficiencia en el uso de la radiación, índice verde normalizado, K_c , ciclo hidrológico, irrigación, cuenca.

ABSTRACT

Sugarcane is an important mobilizer of the economy in NW Argentine. Its production requires large amounts of water, which may originate different environmental impacts. The energetic crisis increases the demand for biofuels derived from sugar, with possible raises in cultivated area and its environmental impacts. Background on sugarcane use of water and radiation involve the effect of a few factors and are locally limited. The aim of this thesis was to study the controls of transpiration, water use efficiency (*WUE*) and radiation use efficiency (*RUE*) in sugarcane crops from NW Argentina, and to infer ecological and productive sustainability status of these agroecosystems. To do this, both efficiencies were calculated as the ratio between sugarcane yield and the amount of inputs (water or radiation). Water consumption was estimated with the model proposed by FAO supplemented with satellite derived data (normalized difference vegetation index, *NDVI*). The absorbed radiation was estimated based on its relationship with the *NDVI*. Both *WUE* and *RUE* showed a variability, comparable with the entire range documented in the international literature. Genotype and crop's age were the most influential factors on both efficiencies. Estimated water requirements exceeded by up to 100% those of pristine ecosystems (Yungas) and also precipitation, and represented an energy loss from the surface as high as 72.6 W m^{-2} (74.3% of incident shortwave radiation). The identified potential impacts depend on management strategies, and include: food web modifications associated with energy flow, alterations of rivers (flow reduction, flood after rainfall events and pollution), quali/quantitative modifications of watertables, surface cooling, regional export of water vapor, among others. The results of this thesis may assist crop management decisions, minimizing the occurrence of environmental impacts.

Keywords: *Saccharum*, water use efficiency, radiation use efficiency, normalized difference vegetation index, K_c , hydrologic cycle, irrigation, watershed.

Capítulo 1

Introducción general

1.1. INTRODUCCION

El cultivo de caña de azúcar representa una de las actividades agropecuarias más importantes para la economía del noroeste de la Argentina (NOA), constituyendo uno de los principales generadores de ingresos y de empleos de la región. En el año 1998, la producción relacionada con el azúcar de caña representaba aproximadamente el 35% del Producto Bruto Geográfico de Tucumán. Según el mismo informe, la agroindustria cañera ocupa en forma directa a casi 40.000 personas, lo que la convierte en una de las mayores fuentes de empleo del NOA. A este panorama se suma un escenario igualmente favorable en los mercados internacionales: durante la última década el precio FOB del azúcar aumentó en un 150% (Bolsas de Nueva York y Londres) (Asocaña, 2010) en respuesta a las crecientes demandas de azúcar y etanol (principales productos obtenidos del cultivo). Sin embargo, a pesar de presentar un panorama tan auspicioso, estos beneficios pueden constituir al mismo tiempo una amenaza para la región. Esto se debe a que, al igual que ocurre en muchos agroecosistemas, el manejo se rige por la maximización del retorno económico, mientras que el criterio de sustentabilidad constituye un objetivo secundario, o que muchas veces es dejado de lado.

Un ecosistema sustentable es aquel que, en presencia del ciclo habitual de disturbios que lo caracteriza, es capaz de conservar la diversidad de organismos de sus principales grupos funcionales, su productividad y las tasas de ciclado de los principales elementos biogeoquímicos (Chapin et al., 1996). De este concepto se desprende la idea de que la sustentabilidad de un agroecosistema debería ser un criterio central en la planificación de su manejo. De esta manera se podría asegurar la estabilidad temporal de su funcionamiento y, con ésta, la continuidad de los beneficios directos (cosecha) e indirectos (polinización y control biológico de plagas, ciclado de nutrientes, almacenamiento de agua, etc.) que el hombre obtiene del mismo.

El agua es un elemento con gran influencia sobre la sustentabilidad, ya que constituye uno de los principales determinantes del funcionamiento y la producción de un ecosistema. Asimismo, debido a su gran movilidad, alteraciones en la cantidad y/o calidad del agua que ocurren en un ecosistema habitualmente comprometen el funcionamiento de ecosistemas vecinos (Jackson et al., 2001; Jobbágy et al., 2008). Independientemente del origen de tales alteraciones, los efectos los padecen todos los seres vivos, desde microorganismos y vegetales hasta los seres humanos, que requieren el agua para consumo, irrigación, recreación y usos industriales, entre otros.

La agricultura utiliza cerca de un 70% del total del agua que se extrae de ríos, lagos y acuíferos (Secler et al., 1998; Jackson et al., 2001). Esta cifra, puesta en el contexto de escasez hídrica que se está afrontando en distintas regiones del mundo (Postel, 2000), impone al sector agrícola el desafío de utilizar el agua de manera sustentable. Para ello, por ejemplo, no sólo se debería minimizar el volumen necesario para alcanzar determinado nivel de producción, sino que también se debería evitar su contaminación con pesticidas, sales y partículas de suelo que, de otro modo, impactarían sobre otros ecosistemas.

La energía es otro recurso que está afrontando severas deficiencias a nivel mundial, como consecuencia de un desbalance entre oferta y demanda de dicho recurso. Esto responde principalmente al agotamiento de las reservas de combustibles de origen fósil, que se contraponen con los elevados requerimientos energéticos de las

sociedades modernas (Pimentel y Patzek, 2005). Ante este panorama, la agricultura adquiere un rol protagónico como productor de biocombustibles, una forma de energía renovable que sustituye a los combustibles derivados del petróleo. Pero para satisfacer esta demanda se deberían convertir tierras agrícolas, ganaderas y/o forestales a la producción de biocombustibles, al igual que se debería incrementar el uso de agroquímicos (Uhlenbrook, 2007). Esto representa un desafío para la agricultura, ya que debe ser capaz de asumir este nuevo rol sin descuidar las necesidades alimenticias de una población en continuo crecimiento. Asimismo, debe afrontar el desafío de reducir el consumo de agua, el cual es muy elevado comparativamente con el mínimo volumen hídrico involucrado en la obtención de combustibles fósiles (Stone et al., 2010). Caso contrario, representaría un gran riesgo para las escasas reservas hídricas.

La caña de azúcar es una gramínea tropical de tipo C4, perenne y que florece anualmente. La planta de caña de azúcar está compuesta por varios tallos erectos, de hasta 3-4 metros de altura, y con un diámetro aproximado de 5 centímetros (James, 2004). Las hojas están formadas por dos partes: la base foliar y la lámina foliar, que es la continuación de la base foliar y crece libre, sin abrazar al tallo. Cada uno de estos órganos constituye una misma unidad funcional junto con el entrenudo al que se encuentra asociado (James, 2004). Por este motivo, las células del entrenudo continuarán su crecimiento, ensanchando sus paredes y acumulando sacarosa hasta que ocurra la senescencia de la hoja. El sistema radical de la caña de azúcar es en cabellera y está formado exclusivamente por raíces adventicias (Smith et al., 2005). En el sistema radical de la planta adulta se pueden distinguir tres grupos de raíces (Evans, 1935): a) una densa capa de raíces superficiales, encargadas de absorber el agua y los nutrientes del horizonte superficial, b) un grupo poco ramificado y que alcanza una profundidad de 1,5 metros, que provee anclaje a la planta, y c) un tercer grupo, formado por raíces que pueden profundizar hasta 6 metros o más, facilitando el acceso a reservas de agua profundas. La inflorescencia de la caña de azúcar es una panoja laxa, erecta. El principal factor que induce la floración es el acortamiento del fotoperiodo (James, 2004).

Una característica que distingue a este cultivo del resto de las especies domesticadas por el hombre, y que constituye el principal motivo de su utilización, es la elevada capacidad de acumular azúcar (sacarosa) en sus tallos. Este proceso de acumulación tiene lugar en los entrenudos, órgano que constituye el objeto de cosecha. Con la floración de la planta se reduce el contenido de azúcares, lo cual, junto con la interrupción de la elongación de los tallos, determina una caída del potencial de rendimiento (James, 2004).

El cultivo de la caña de azúcar y la utilización del azúcar son de muy larga data. Los primeros registros de consumo de azúcar se remontan 2200 años atrás, en la India. Sin embargo, la expansión de sus fronteras no ocurrió sino hasta mediados del siglo IV D.C., cuando los hindúes comenzaron a cristalizar el jugo de caña, facilitando así su comercialización (Ponting, 2000). No obstante, la máxima expansión ocurrió de la mano de la ampliación de los dominios del imperio árabe, a partir del siglo VIII D.C., llevando consigo las técnicas de cultivo y el azúcar a lo largo de las costas del Mediterráneo, la península ibérica y África oriental. Finalmente, la caña de azúcar llegaría a América hacia fines del siglo XV, transportada por Colón en uno de sus primeros viajes (Sharpe, 1998), distribuyéndose de esta manera a lo largo de los cinco continentes.

En la actualidad la caña de azúcar es cultivada en las regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo. Se utilizan numerosas variedades, las cuales son el resultado de complejas hibridaciones interespecíficas realizadas entre especies del género *Saccharum sp.*, principalmente *S. officinarum L.* y *S. spontaneum L.* (James, 2004). La primera de estas especies se cree que es originaria de la Polinesia, mientras que la segunda se originó y evolucionó a lo largo de toda la franja sur de Asia.

El cultivo de la caña de azúcar comienza con la plantación de la caña semilla, que en la región en estudio consiste en un segmento de tallo de hasta 60 cm de longitud (con 3 a 5 nudos) enterrados a una profundidad de entre 5 y 20 cm (Brito et al., 2005). Este primer ciclo de cultivo es llamado “caña planta” y su duración es variable, dependiendo de la época en que se realiza la plantación: de acuerdo con Barbieri y Villa Nova (1977), cañaverales iniciados hacia fines de invierno tienen una duración aproximada de doce meses (son llamados caña planta de un año), mientras que aquellos iniciados hacia fines del verano duran aproximadamente dieciocho meses (se los llama caña planta de un año y medio). De acuerdo con Brito et al. (2005), la época de plantación más difundida en la región NO de la Argentina es fines de invierno.

A la cosecha del estadio caña planta le sigue una secuencia de ciclos anuales, cada uno de los cuales es denominado “soca”, iniciados a partir del brotado de los rizomas (James, 2004). Se los nombra correlativamente soca 1, 2, etc. según se trate del primero, segundo, etc. años posteriores al estadio caña planta. Si bien el número de socas podría ser elevado, la pérdida de rendimiento asociada al envejecimiento del cultivo obliga a que éste sea arado y se reinicie un nuevo ciclo plurianual (James, 2004). Esta disminución del rendimiento se debe a un conjunto de factores, como por ejemplo alteraciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Magarey 1996; Magarey et al., 1997). Se ha demostrado que la rotación con otros usos de la tierra, al igual que los barbechos, conducen a aumentos significativos en el rendimiento del cañaveral, sensibles tanto en la etapa de caña planta como de socas (Pankhurst et al., 2003; Terán y Sopena, 2004; Pankhurst et al., 2005). Sin embargo, estas prácticas son aplicadas sólo excepcionalmente entre los agricultores (sean pequeños o grandes) del NO Argentino, lo que se traduce en un envejecimiento prematuro del cañaveral y una menor edad de renovación (Terán y Sopena, 2004).

El período de cosecha de la caña de azúcar en el NO Argentino, independientemente del estadio en el que se encuentre el cultivo, está concentrado entre los meses de mayo y noviembre (Ghersa et al., 2006; Tonatto et al., 2008). Existen dos sistemas de cosecha distintos, que difieren básicamente en que uno de ellos está asociado a la quema del cultivo previo a la recolección manual de los tallos. Este es el sistema de cosecha tradicional, y la quema pretende eliminar las hojas secas, lo que facilita la labor de recolección y reduce la cantidad de residuos que llegan a la industria. Sin embargo, debido a que esta práctica genera una considerable contaminación de la atmósfera (Cheesman, 2004), gradualmente es reemplazada por otro sistema, llamado cosecha de “caña verde”, que prescinde de la quema del cañaveral. Este manejo alternativo, que normalmente está asociado a la cosecha mecanizada del cultivo, reemplazó casi por completo a la caña quemada en Australia (Cheesman, 2004). Estudios locales basados en información satelital indican que en Tucumán, entre los años 2004 y 2006, aumentó un 26% el número de focos registrados en la época de zafra (Tonatto et al., 2008). No obstante, según estos autores la proporción del área cosechable que es sometida a la quema en ningún caso superó el 20%.

El cultivo de caña de azúcar posee requerimientos hídricos elevados, superiores en promedio a los de otros cultivos estivales, como maíz y el algodón (Allen, 1998), y al de sistemas de doble cultivo, como trigo-arroz, trigo-maíz y trigo algodón (Jalota y Arora, 2002). Dependiendo de distintas variables (condiciones climáticas, genotipo, manejo, etc.), la demanda de agua promedio del cañaveral se encuentra en el rango comprendido entre los 1000 y los 3000 milímetros anuales (Doorenbos et al., 1979; Jalota y Arora, 2002; Stewart et al., 2006). Consecuentemente, tanto en el NO Argentino (donde las precipitaciones anuales promedian los 800 mm) como en la mayor parte de las regiones cañeras del mundo, el cultivo de caña de azúcar se realiza habitualmente con riego suplementario. Si bien se utilizan diversos sistemas de riego para la producción de caña, en la región de estudio predomina el riego por gravedad, particularmente los sistemas por melgas y por surcos (Ing. Fadda, comunicación personal). Debido a que la irrigación impone una fuerte presión sobre las reservas de agua dulce, se debe procurar lograr máximas eficiencias en el uso del agua (*EUA*).

El riego por gravedad se caracteriza por tener una eficiencia comparativamente baja en relación con otros sistemas, tales como aspersión y goteo. Sin embargo, cuando es utilizado con un manejo apropiado puede alcanzar eficiencias comparables a la de éstos últimos (Lecler et al., 2008). De acuerdo con estos autores, si a este aspecto le sumamos que presenta mínimos requerimientos de energía (debido a que extrae el agua directamente de los cursos de agua superficiales, prescindiendo del uso motores para el bombeo), el riego gravitacional puede constituir una estrategia de manejo interesante.

Al igual que el agua, la radiación solar representa un recurso muy importante para el cultivo de caña de azúcar. En términos generales, tal como ocurre con los demás cultivos, constituye el principal factor limitante para la producción de biomasa en ausencia de restricciones hídricas y nutricionales (Muchow et al., 1994). Esto se debe a que es la principal entrada de energía a partir de la cual se sintetizarán los azúcares necesarios para el crecimiento y mantenimiento de los tejidos. Por lo tanto, en el contexto de la crisis energética y de la obtención de etanol a partir de la caña de azúcar, maximizar la eficiencia en el uso de la radiación (*EUR*) permitiría tener un retorno máximo por unidad de insumo energético. Al mismo tiempo, esto conduciría a una máxima productividad por unidad de superficie, reduciendo las necesidades de ampliar la frontera agrícola. Por último, comparativamente con lo que ocurre con otros cultivos que proveen materia prima para la producción de etanol, el volumen de agua requerido para producir etanol es mucho menor en caña que, por ejemplo, en maíz (458 m³ y 2036 m³ de agua por m³ de etanol, respectivamente) (Stone et al., 2010).

Existen algunos antecedentes sobre la interacción entre ambas *EUA* y *EUR* y las estrategias de manejo del cañaveral. Por ejemplo, distintos investigadores encontraron que tanto la *EUA* (Singh et al., 2007) como la *EUR* (Robertson et al., 1996; Park et al., 2005) fueron mayores en cañaverales de un año de edad (caña planta) que en cañaverales de dos o más años (socas). En base a estos resultados, si se redujera la edad de renovación del cultivo aumentarían la eficiencia promedio de toda la rotación.

En sistemas irrigados de Brasil la *EUA* aumentó paulatinamente a lo largo de un mismo ciclo de producción, con valores máximos entre los 7 y 9 meses de edad (etapa de máximo crecimiento), alcanzando los valores mínimos entre los 12 y 13 meses, luego de una caída abrupta (Silva et al., 2009). De manera similar a lo observado con el agua, en Hawaii y Australia se encontró que la *EUR* también fue menor en cultivos de caña con un crecimiento acumulado de entre 12 y 24 meses (Muchow et al., 1997). De este

modo, decisiones de manejo que modifiquen la longitud del ciclo de cultivo podrían repercutir sobre ambas *EUA* y *EUR* globales del sistema.

Por otro lado, aquellas prácticas que alteran el calendario de cultivo también pueden afectar a estos indicadores, por ejemplo evitando la incidencia de factores de estrés, los que reducirían la respuesta del cultivo para una misma cantidad de recurso (agua o energía) utilizado. Así, como el efecto del estrés hídrico sobre el rendimiento es despreciable en macollaje y muy fuerte cuando el canopeo está desarrollado ($IAF > 2$) (Robertson et al., 1999), las fechas de plantación y cosecha pueden seleccionarse de modo de evitar la ocurrencia de estrés en la etapa de mayor sensibilidad. En relación con la irrigación del cultivo, Inman-Bamber et al. (1998) indicaron que con una provisión de riego limitada pero oportuna se pueden obtener elevados niveles de *EUA*, logrando importantes reducción en el consumo de agua.

La elección de la variedad de cultivo también constituye una estrategia de manejo que podría conducir a una mayor resistencia a la sequía y, con ésta, a una mayor *EUA* (Inman-Bamber y Smith 2005). Además, hay antecedentes que sugieren que la variedad también podría influir sobre la *EUR* (Robertson et al., 1996; Singels et al., 2005).

Si bien no existen estudios sobre ambas *EUA* y *EUR* en cañaverales irrigados del NO de la Argentina, hay antecedentes que sugieren que estos indicadores están siendo afectados por el manejo. Por ejemplo, en concordancia con algunos de los antecedentes presentados, Ferraro et al. (2009) encontraron que la edad y la variedad son factores importantes para explicar el rendimiento (tanto de caña como de azúcar) del cultivo, mientras que el mes de cosecha tuvo una importancia media en cuanto a su influencia sobre el rendimiento de caña y alta sobre el rendimiento de azúcar. Esto sugiere que los mayores rendimientos observados en cañaverales jóvenes (de 1 o 2 años de edad), para determinada variedad o para ciertos meses de cosecha podrían estar mediados por cambios en la *EUA* y *EUR*, o al menos una de ellas.

1.2. OBJETIVOS

- ✓ Objetivo general:

Estudiar el funcionamiento de los sistemas de producción de caña de azúcar desde el punto de vista del uso del agua (transpiración) y de la radiación.

- ✓ Objetivos específicos:

Analizar la interacción entre la evapotranspiración (ET) del cultivo y las estrategias de manejo más frecuentes. Para ello, un objetivo secundario será calibrar una metodología (cultivo y sitio-específica) que permita estimar el K_c (y finalmente la ET) a partir de información proveniente de imágenes satelitales (IVN).

Comparar la eficiencia en el uso del agua (EUA) que se obtiene en respuesta a las estrategias de manejo más frecuentes.

Comparar la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) característica de tales estrategias de manejo.

Diagnosticar la sustentabilidad de los principales esquemas de manejo actuales y de posibles escenarios de manejo futuros, contrastantes en términos de ambas EUA y EUR.

Capítulo 2

*Estimación de la transpiración de caña
de azúcar en la Provincia de Jujuy.*

2.1. INTRODUCCION

En los ecosistemas terrestres, el flujo de vapor de agua hacia la atmósfera (y la respectiva energía asociada) está representado por la suma de la transpiración (t) y la evaporación del agua almacenada en el suelo (E), proceso que recibe el nombre de evapotranspiración (ET). La ET es un proceso de gran importancia, tanto a escala local como regional (Menenti, 2000). Por ejemplo, está directamente relacionado con el desecamiento del suelo, y éste, a la vez, con las necesidades hídricas de las plantas y con los recorridos (y sus consecuencias positivas y negativas) que puede seguir el agua cuando ingresa en estado líquido al sistema terrestre. Pero además, a escala regional puede afectar el balance de energía, alterando el clima, por ejemplo, a través del proceso de formación de nubes y los patrones de precipitación (Bounoua et al., 2002). Como consecuencia, la adecuación del aporte de agua a los requerimientos del cultivo es fundamental para alcanzar un objetivo de producción sustentable (Meyer, 1997; Inman-Bamber y McGlinchey, 2003). Por lo tanto, la cuantificación de la ET de un cultivo constituye un proceso de gran utilidad ya que permitirá estudiar sus posibles controles y las consecuencias derivadas de su alteración. Además, permitirá realizar un manejo preciso del agua, sincronizando en una escala diaria o semanal los aportes de agua por irrigación con la demanda, minimizándose así posibles impactos ambientales (Inman-Bamber y McGlinchey, 2003).

Existen numerosas técnicas para cuantificar la ET , las cuales pueden diferir considerablemente de acuerdo con la mecánica de cálculo, la precisión de su estimación y la cantidad y tipo de parámetros involucrados (Doorenbos y Pruitt, 1975; Idso et al., 1975; Jackson et al., 1977; Gunston y Batchelor, 1983; Rana et al., 1990, 2000; Allen, 1995; Bausch, 1995; Evett et al., 1995; Bastiaanssen et al., 1998; Kite y Droogers, 2000;). Ante este panorama, la FAO organizó una consulta de expertos y recomendó un procedimiento denominado " $K_c ET_0$ " para estimar la ET de vegetación espontánea y agrícola, entre los que se encuentra la caña de azúcar, con detallados lineamientos para estimar todos los parámetros incluidos en el modelo (Allen et al., 1998). Básicamente, consiste en calcular la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (ET_c), esto es en ausencia de restricciones bióticas y abióticas, como el producto entre la evapotranspiración de referencia (ET_0) y el coeficiente único del cultivo (K_c). La ET_0 representa la pérdida de agua de una superficie de referencia, definida como un pastizal homogéneo y sin restricciones hídricas ni nutricionales, y expresa el poder de evaporación de la atmósfera. El K_c , por el contrario, expresa el efecto sobre la evapotranspiración originado por las diferencias entre el cultivo y la superficie de referencia. El K_c puede ser reemplazado por el coeficiente dual del cultivo, que consiste en la suma de un coeficiente que representa la transpiración, llamado coeficiente basal (K_{cb}), y otro que representa la evaporación (K_e).

Para calcular ambos K_c y K_{cb} habitualmente se utilizan valores específicos de cada cultivo y de sus distintas etapas de desarrollo (inicial, de desarrollo, mediados de temporada y final -i.e., maduración o senescencia-) y luego, por interpolación, se representa la transición entre una etapa y otra (Doorenbos y Pruitt, 1975; Allen et al., 1998). Entonces, utilizando esta curva, y considerando que los coeficientes dependen principalmente de la estructura del canopeo, su valor se va actualizando de acuerdo con el estado fenológico del cultivo. Sin embargo, la heterogeneidad espacial y temporal del canopeo representa un desafío para implementar este método de manera precisa, especialmente ante la ocurrencia de disturbios frecuentes que ocasionen desvíos respecto a dicha curva. Ante este panorama, la caracterización del canopeo mediante el

uso del índice verde normalizado IVN (y otros índices obtenidos con sensores remotos) proporciona una buena descripción (y relativamente económica) de la dinámica de los coeficientes de cultivo (Heilman et al., 1982; Bausch y Neale, 1987; Choudhury et al., 1994; Duchemin et al., 2006; López Urrea et al., 2009).

El objetivo de este capítulo fue estimar la transpiración del cultivo utilizando un modelo basado en información satelital (IVN), parametrizándolo en función del comportamiento del cultivo caña de azúcar creciendo en las condiciones locales. Para ello, se estableció una relación entre los valores extremos del K_{cb} de caña de azúcar (Allen et al., 1998; Inman-Bamber y McGlinchey, 2003) y los valores de IVN obtenidos en la zona de estudio, lo que permitió estimar la transpiración diaria a nivel de pixel (250 x 250 m.) aplicando el procedimiento " K_{cET_0} " desarrollado por la FAO. Luego, estas estimaciones diarias fueron corregidas en función de un factor de estrés hídrico (K_e), obtenido a partir del cálculo de un balance de agua diario, y finalmente fueron integradas para obtener una estimación de la transpiración del cultivo acumulada a lo largo de todo el ciclo de producción. Por último, para evaluar el modelo parametrizado se compararon los resultados con los de otros dos modelos: uno con la misma mecánica de cálculo pero parametrizado para maíz (Calera Belmonte et al., 2003; González Piqueras et al., 2003), y otro con una mecánica de cálculo distinta y que fue calibrado para sorgo y girasol (Mailhol et al., 1997) y para maíz y trigo (Khaledian et al., 2009).

2.2. MATERIALES Y METODOS

2.2.1. Zona de estudio y manejo del cultivo

La zona de estudio se encuentra en el este de la Provincia de Jujuy, Argentina (24°S, 65°O). Posee un clima continental subtropical (temperatura media anual 20-22°C), con una pluviometría media de 800 mm anuales concentrados principalmente entre los meses de diciembre y marzo. Debido a que el paisaje es ondulado, con un rango altitudinal de 300 a 600 msnm, y a que está surcado por varios cursos de agua, presenta una amplia variedad de suelos, con texturas que van desde arenosas a arcillosas. Además, son frecuentes las condiciones de salinidad y la presencia de la napa freática en la rizósfera.

El manejo del cañaveral consiste en un planteo intensivo. Se utiliza un plan preventivo, que involucra diversas estrategias, para evitar la incidencia de plagas, enfermedades y malezas. Tanto el plan de fertilización (basado en diagnósticos edáficos y foliares) como el manejo de la irrigación (que consiste en la técnica de riego por inundación) pretenden evitar la ocurrencia de deficiencias que afecten el normal desarrollo y crecimiento del cultivo. Además, ante condiciones de salinidad o de ascenso de la napa freática a la rizósfera, se aplican medidas correctivas para aliviar o eliminar tales restricciones. Por otro lado, la renovación del cañaveral (que ocurre cuando se retorna al estadio caña planta, después de que el terreno es arado) suele ocurrir a una edad de entre 4 y 5 años (estadios soca 3 y 4, respectivamente). Este esquema de manejo intensivo redundó en un rendimiento promedio cercano a las 90 toneladas de caña por hectárea, muy superior al promedio mundial de 65 t ha⁻¹ (datos correspondientes al período 2002-2005, estimado a partir de la información disponible en <http://www.sugarcane.res.in/index.php/mis/sugarcane-statistics>).

2.2.2. Descripción de la base de datos

Se analizó un total de 17 lotes, todos bajo producción de caña de azúcar, durante cuatro zafas sucesivas (2002 al 2005, inclusive) y caracterizados por una superficie media de 63 has., con mínimos y máximos de 41 y 121 has., respectivamente. La cantidad de píxeles por lote fue de un promedio de 4, con mínimos y máximos de 2 y 7, respectivamente, lo cual constituyó por lote un promedio de 35% del área caracterizada, con mínimos y máximos de 19 y 58%, respectivamente. El total de datos analizados fue de 240. El criterio de selección de los lotes consistió en el cumplimiento de distintos requisitos: a) proporcionar una representación de las distintas áreas (fincas) que comprenden al Ingenio azucarero (por lo menos 2 lotes por finca), b) evitar la presencia de la napa en el perfil y c) tener una pendiente suave para reducir o excluir la escorrentía. La caracterización de cada lote incluyó información edáfica (clase textural, contenido hídrico en el punto de marchitez permanente y en capacidad de campo), meteorológica (temperaturas mínima y máxima diaria, precipitación diaria, radiación diaria y velocidad del viento) y de manejo (año de zafra, variedad cultivada, época de plantación, mes de cosecha, mes de inicio, longitud de ciclo, edad, fecha de eventos de riego, rendimiento). Además, se disponía de información de índice verde normalizado (*IVN*) obtenida por el sensor MODIS a bordo del satélite TERRA (producto MOD13Q1, escena h12v11), expresada para cada uno de los píxeles que integran a los distintos lotes, con una resolución de 230 metros x 230 metros (5,3 has). Como la información satelital es publicada con una frecuencia de 16 días, para cada píxel se realizó una interpolación lineal entre los valores de fechas consecutivas con el objetivo de tener una representación del *IVN* en escala diaria, compatible con el modelo de evapotranspiración. Por último, a cada píxel se le asignó toda la información correspondiente al lote del que forma parte.

2.2.3. Parámetros meteorológicos y evapotranspiración de referencia (ET_0)

La información meteorológica fue obtenida de un total de 36 estaciones distribuidas a lo largo de todo el ingenio. El criterio utilizado para asignar una casilla meteorológica a cada uno de los lotes incluidos en el estudio fue por máxima proximidad. Los parámetros recopilados en cada estación fueron la precipitación diaria, las temperaturas mínima y máxima diarias y la velocidad del viento. La radiación solar incidente (o radiación de onda corta) fue registrada por un único sensor, ubicado en el centro del área de estudio y a una distancia respecto a los lotes que en ningún caso superó los 40 kilómetros.

La estimación de la ET_0 [mm día^{-1}] se realizó utilizando la metodología propuesta por Priestley & Taylor (1972) (P-T), representada por la siguiente función:

$$ET_0 = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot (R_n - G) \quad (2.1)$$

donde α es un factor empírico igual a 1,26 (Priestley & Taylor, 1972), λ es el calor latente de vaporización del agua ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$), Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor [$\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$], γ es la constante psicrométrica [$\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$], R_n es la radiación neta [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$] y G es el flujo de calor del suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]. γ se estimó

en función de la altitud (Allen et al., 1998) y, como su valor es relativamente estable y no se disponía de una medida precisa de la altitud de cada lote, se calculó el valor correspondiente a 400-500 msnm y se lo asumió constante e igual a $0,064 \text{ KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$. Los parámetros Δ y R_n se obtuvieron de acuerdo con los procedimientos sugeridos por Allen et al. (1998). Por último, debido a que la estimación de ET_0 se realizó a una escala diaria el valor de G se asumió igual a cero (Allen et al., 1998; Guerschman et al., 2009).

La metodología de P-T difiere de aquella propuesta en el modelo de Allen et al. (1998) para estimar la ET_0 ("FAO Penman-Monteith" (P-M)). Sin embargo, existen diversos argumentos que respaldan la posibilidad de utilizar la metodología de P-T. Por ejemplo, las estimaciones de la ET_0 resultantes de P-T y P-M fueron similares tanto en la zona de estudio (Ghersa et al., 2007) como en otras áreas (Mekonnen y Bastiaanssen, 2000; Garatuza-Payan et al., 2003). Además, las estimaciones de ET_c fueron más precisas cuando la ET_0 se obtuvo por P-T (Garatuza-Payan et al., 1998). Por último, se ha demostrado la validez de la metodología de P-T para ser utilizada con el modelo " $K_c ET_0$ " propuesto por la FAO (Mekonnen y Bastiaanssen, 2000; Garatuza-Payan et al., 2003). Estos resultados, sumados a la mayor simplicidad del modelo de P-T y a la posibilidad de obtener los parámetros involucrados en la fórmula a partir de sensores remotos (Mekonnen y Bastiaanssen, 2000), redundaron en que P-T haya sido el método escogido para estimar la ET_0 en esta tesis.

2.2.4. Coeficiente basal de cultivo (K_{cb})

De acuerdo con los conceptos presentados en la introducción, la evapotranspiración en condiciones estándar (ET_c) puede expresarse utilizando el coeficiente único de cultivo o bien el coeficiente dual de cultivo (ecuaciones 2.2 y 2.3, respectivamente). La diferencia entre uno y otro radica en que mientras el K_c resume al total de las pérdidas de agua que salen del sistema suelo-cultivo, el coeficiente dual discrimina estas salidas entre aquellas originadas por la transpiración del cultivo (K_{cb}) y las originadas por la evaporación directa del agua (K_e).

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (2.2)$$

$$ET_c = ET_0 \cdot (K_{cb} + K_e) \quad (2.3)$$

Sin embargo, como las condiciones estándar asumidas en el cálculo de la ET_c difícilmente se cumplen en condiciones de campo, las ecuaciones 2.2 y 2.3 deben ser modificadas. Así, la estimación de la ET bajo condiciones de restricción hídrica ($ET_{c\ aj}$) involucra el coeficiente de estrés hídrico (K_s) [0 - 1], que reduce el componente de la transpiración de la ecuación 2.3 (Allen et al., 1998) de acuerdo con:

$$ET_{c\ aj} = ET_0 \cdot (K_{cb} \cdot K_s + K_e) \quad (2.4)$$

En ausencia de limitantes hídricas el valor de K_s es igual a 1, por lo que ambas ET_c y $ET_{c\ aj}$ se igualan. Pero cuando el contenido hídrico edáfico es menor que determinado umbral (que depende del cultivo y del tipo de suelo), K_s cae por debajo de 1, haciéndose cada vez menor conforme el estrés hídrico se acentúa, de modo que $ET_c > ET_{c\ aj}$. Los factores que afectan el valor de K_s son el agua total disponible en el perfil explorado por las raíces (ATD), la fracción del ATD que el cultivo puede utilizar antes

de experimentar estrés hídrico (p) y el desecamiento diario de la rizósfera (D_r), de acuerdo con (Allen et al., 1998):

$$K_s = (ATD - D_r) / (ATD - pATD) \quad (2.5)$$

El valor de p [0 - 1], que es función del cultivo, del tipo de suelo y de la ET , se estimó con la metodología propuesta por Allen et al. (1998), ajustando su valor en base a las características edáficas de cada lote y al valor que adquirió la ET diaria a lo largo de todo el ciclo de cultivo. El ATD [mm] se estimó como la diferencia entre el contenido hídrico [$m^3 m^{-3}$] cuando el suelo se encuentra en capacidad de campo (θ_{CC}) y en punto de marchitez permanente (θ_{PMP}), extrapolado para la profundidad [m] explorada por las raíces (Z_r) (Allen et al., 1998):

$$ATD = 1000 \cdot (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \cdot Z_r \quad (2.6)$$

Para calcular el valor de Z_r se trabajó con un modelo de tiempo térmico desarrollado para maíz (Cárcova y Otegui, 1997, tomado de Dardanelli et al., 2003). Dicho modelo fue restringido de acuerdo con algunas características del cultivo de caña de azúcar para lograr una mejor representatividad del mismo: el valor máximo de Z_r bajo condiciones de riego puede considerarse igual a 150 cm (Ball-Coelho et al., 1992; Allen et al., 1998; Smith et al., 2005); luego de la cosecha el cultivo pierde un 17% de su biomasa radical (Ball-Coelho et al., 1992), utilizando el 83% restante para reiniciar el crecimiento en el nuevo ciclo de cultivo. Luego, se evaluó el grado de sincronización entre los momentos de máximo de Z_r y de máximo K_{cb} como indicador del comportamiento del modelo.

Para estimar el desecamiento de la rizósfera (D_r) [mm] se realizó un balance hídrico diario que simula la dinámica del agua en el perfil explorado por las raíces del cultivo. Para ello se utilizó la siguiente expresión (Allen et al., 1998):

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - Es)_i - I_i - AC_i + ET_{c,i} + Pe_i \quad (2.7)$$

donde $D_{r,i}$ es el desecamiento del perfil al final del día i , $D_{r,i-1}$ es el contenido de humedad en la rizósfera al final del día $i-1$, P_i es la precipitación registrada el día i , Es_i representa el escurrimiento superficial en el día i , I_i es la irrigación aportada el día i , AC_i es el ascenso capilar del agua freática durante el día i , $ET_{c,i}$ es la evapotranspiración del cultivo en el día i y Pe_i es la percolación profunda a lo largo del día i . De todos estos parámetros, Es_i y AC_i son excluidos de la fórmula debido a los criterios de selección de lotes presentados en esta misma sección (ver *Descripción de la base de datos*).

2.2.5. Parametrización de la relación entre el K_{cb} y el IVN para el cultivo de caña de azúcar

Los valores de K_{cb} e IVN se vinculan linealmente a través de la siguiente ecuación general (Bausch y Nale, 1987, 1989; Hunsaker et al., 2003; Calera Belmonte et al., 2005; Gonzalez-Piqueras, 2007):

$$K_{cb} = m \cdot IVN + b \quad (2.8)$$

donde el valor de los parámetros m , la pendiente, y b , la ordenada al origen, depende del cultivo en cuestión.

Por lo tanto, para parametrizar la relación entre el K_{cb} y el IVN para el cultivo de caña se caracterizaron para estas variables los valores extremos más representativos del cultivo de caña de azúcar y de las condiciones agroecológicas locales. El mínimo valor de K_{cb} considerado es el valor recomendado por la FAO, y no difiere entre cultivos (Allen et al., 1998). El K_{cb} máximo se obtuvo a partir del máximo valor de K_c sugerido para caña de azúcar ($K_{c\ med} = 1,25$) (Allen et al., 1998; Inman-Bamber y McGlinchey 2003; Carr y Knox, 2011), al que se le restó un factor de corrección de 0,05, que es aplicable a cultivos con una cobertura de suelo mayor al 80% (Allen et al., 1998). El valor de IVN mínimo se estimó como el promedio del mínimo IVN observado en los pixeles de aquellos lotes que fueron cosechados y arados. El IVN máximo consistió en el valor a partir del cual no se esperan nuevos aumentos del K_{cb} , y se estimó como aquel nivel con el que se obtuvo un 80% de intercepción de la radiación solar, de acuerdo con resultados encontrados en caña (Inman Bamber y McGlinchey 03). (La metodología utilizada para relacionar al IVN con la intercepción de la radiación solar (%) se presenta en el capítulo 4).

Finalmente, se realizó un análisis de regresión lineal entre los valores cardinales de ambas variables, de acuerdo con el procedimiento descripto por Calera Belmonte et al. (2005).

2.2.6. Evaluación del modelo parametrizado

El proceso de evaluación consistió en comparar al modelo parametrizado con las estimaciones obtenidas por la aplicación de dos modelos más. Uno de éstos se basa en la misma mecánica de cálculo pero fue desarrollado y utilizado para el cultivo de maíz (Cuesta et al., 2005; González- Piqueras et al., 2003; Rocha et al., 2012):

$$K_{cb} = 1,37 \cdot IVN - 0,017 \quad (2.9)$$

El otro modelo que se utilizó está basado en una mecánica de cálculo distinta y fue utilizado con resultados satisfactorios para diversos cultivos, como sorgo y girasol (Mahilol et al., 1997) y maíz y trigo (Khaledian et al., 2009). Resumidamente, la estimación del K_c se realiza a partir del índice de área foliar (IAF) del cultivo, de acuerdo con (Allison et al., 1993):

$$K_c = K_{c\ max} \cdot \left(1 - e^{-x_{kc} \cdot IAF} \right) \quad (2.10)$$

donde $K_{c\ max}$ es el valor máximo de K_c para el cultivo creciendo en las condiciones locales. El factor x_{kc} , que representa las posibles diferencias de consumo de agua entre cultivos, puede asumirse igual a 1 (Novak, 1981; Kutilek y Nilsen, 1994). El IAF se estimó en dos etapas sucesivas, con procedimientos que ya fueron aplicados satisfactoriamente en caña de azúcar por Picoli (2006) y Sugawara et al. (2009). En la primera etapa se calculó la fracción de cobertura del suelo (F_c) a partir del IVN (Choudhury et al., 1994):

$$F_c = 1 - \left(\frac{IVN_{\max} - IVN}{IVN_{\max} - IVN_{\min}} \right)^{0,9} \quad (2.11)$$

donde IVN_{\max} e IVN_{\min} son los valores máximo y mínimo de IVN observados en la imagen. En la segunda etapa, se estimó el IAF a partir del valor de F_c (Norman et al., 2003):

$$IAF = -2 \ln(1 - F_c) \quad (2.12)$$

En base al IAF también se calculó el coeficiente de partición, que indica la fracción de la evapotranspiración que es atribuible a la transpiración (Novak, 1981; Sepaskhah e Ilampour, 1995):

$$C_p = 1 - \exp(-0,57 \cdot IAF) \quad (2.13)$$

Entonces, al multiplicar el K_c obtenido con la ecuación 2.10 por el coeficiente de partición, C_p , se obtuvo el valor de K_{cb} .

2.2.7. Análisis de los resultados

En primera instancia se describió la dinámica del K_{cb} en respuesta al IVN para cada uno de los modelos considerados y luego se establecieron comparaciones entre éstos. Además, para distintos niveles de IVN se promediaron los valores obtenidos por los tres modelos, y se calcularon la desviación estándar y el coeficiente de variación, y se ponderó la importancia de las diferencias en base a la frecuencia con que ocurren las distintas clases de IVN en la base de datos. Por otro lado, para estudiar la dinámica temporal de las discrepancias entre modelos se analizaron los parámetros mencionados (además del IVN y la ET_0) a lo largo de un ciclo de producción. Luego, considerando los modelos de a pares, se realizaron análisis de regresión lineal y, para cada combinación posible, se evaluó si la pendiente de la recta ajustada difería significativamente de la pendiente de la recta 1:1, y si la ordenada al origen era estadísticamente distinta de cero (test F, nivel de alfa 0,05).

2.3. RESULTADOS

Los valores de K_{cb} mínimo y máximo utilizados fueron 0,15 y 1,20. Desde el punto de vista del IVN se consideraron un mínimo de 0,2077 y un máximo de 0,8473. el nivel mínimo fue igual a 0.2077.

La ecuación resultante fue: $K_{cb} = 1,6417 * IVN - 0,191$ (modelo 1, figura 2.1a). De acuerdo con los criterios ya expuestos, al modelo obtenido se le impusieron límites inferior (0,15) y superior (1,20) (ver línea punteada en figura 2.1a) para que las estimaciones respeten el rango definido por los valores cardinales de K_{cb} :

$$K_{cb} = \max[\min[1,6417 \cdot IVN - 0,191; 1,20]; 0,15] \quad (2.14)$$

Como tendencia general, el K_{cb} estimado con cualquiera de los modelos aumentó conforme se incrementó el IVN (Figura 2.1.a). Al comparar los modelos 1 y 2 se

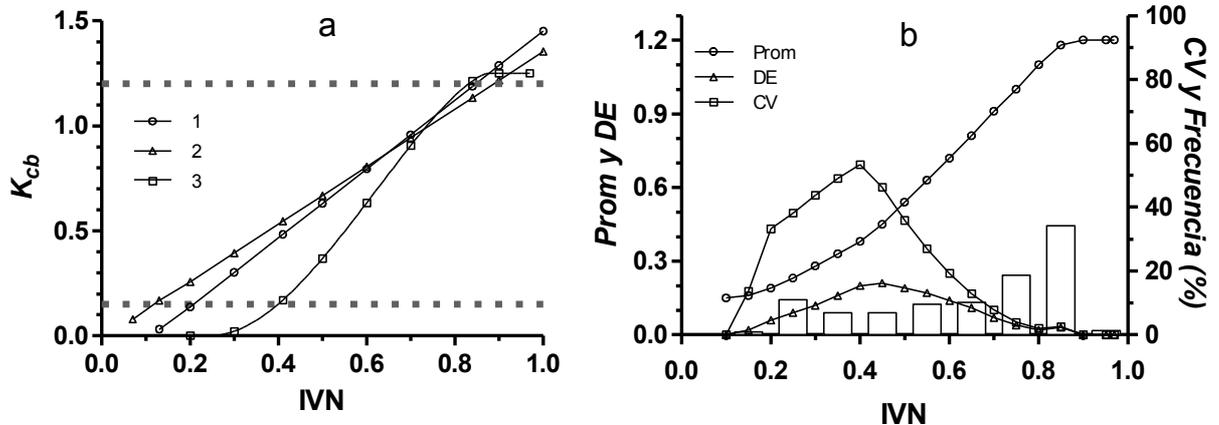


Figura 2.1. Respuesta del K_{cb} ante cambios en el valor del IVN de caña de azúcar. En a) se presentan los valores obtenidos en base al modelo 1 (círculos), 2 (triángulos) y 3 (cuadrados). Las líneas punteadas representan los límites inferior y superior del K_{cb} impuestos para los tres modelos. En b) se presentan el promedio (círculos), el desvío estándar (triángulos) y el coeficiente de variación (cuadrados) resultantes del uso de los tres modelos. Las barras representan la frecuencia relativa de las distintas clases de IVN .

observa que a niveles bajos de IVN , la función calibrada para maíz (modelo 2) presentó mayores valores de K_{cb} , mientras que la situación se revirtió a partir de un IVN aprox. igual a 0,7. El comportamiento del modelo 3 fue comparable con la dinámica de una función sigmoidea, donde la respuesta del K_{cb} ante incrementos del IVN fue inicialmente débil ($IVN < 0,4$, aprox.), luego se hizo máxima ($0,4 < IVN < 0,7$) y se debilitó nuevamente a partir de un $IVN \approx 0,7$. Al comparar a los tres modelos se observa que para valores de IVN bajos y medios el modelo 3 subestimó el K_{cb} , anulándose las diferencias con los otros modelos cuando el IVN se aproximó a 0,75. A partir de este valor las estimaciones de los modelos 1 y 3 resultaron aproximadamente iguales entre sí, y levemente superiores a las del modelo 2. Como se observa en la figura 2.1.b, las mayores discrepancias entre los modelos ($CV = 53\%$ y $DE = 0,21$) se observaron a valores medios-bajos de IVN (entre 0,3 y 0,5), rango que comprendió menos del 15% del total de los datos de IVN incluidos en el estudio. Por el contrario, para el rango de IVN 0,7 - 0,9, que concentró la mayor frecuencia de los datos (50% aproximadamente), los CV y DE fueron inferiores al 8% y al 0,1, respectivamente. Por lo tanto, la variabilidad atribuible a las discrepancias entre modelos resulta mucho menor de lo que podría esperarse si la distribución de frecuencias de las clases de IVN fuera más homogénea.

La comparación de los modelos en base a los valores de transpiración (figura 2.2) también permite analizar la variabilidad originada por el uso de los modelos y, además, considerar su importancia en el contexto de la magnitud de la ET_0 y de la transpiración total anual. Así, se distinguen dos situaciones. Cuando el IVN fue inferior a 0,5 la variabilidad expresada como CV fue máxima. Sin embargo, su contribución respecto a la transpiración total anual fue baja debido a que el DE fue bajo en esta etapa (producto de los reducidos niveles de transpiración) y debido a que la duración de esta

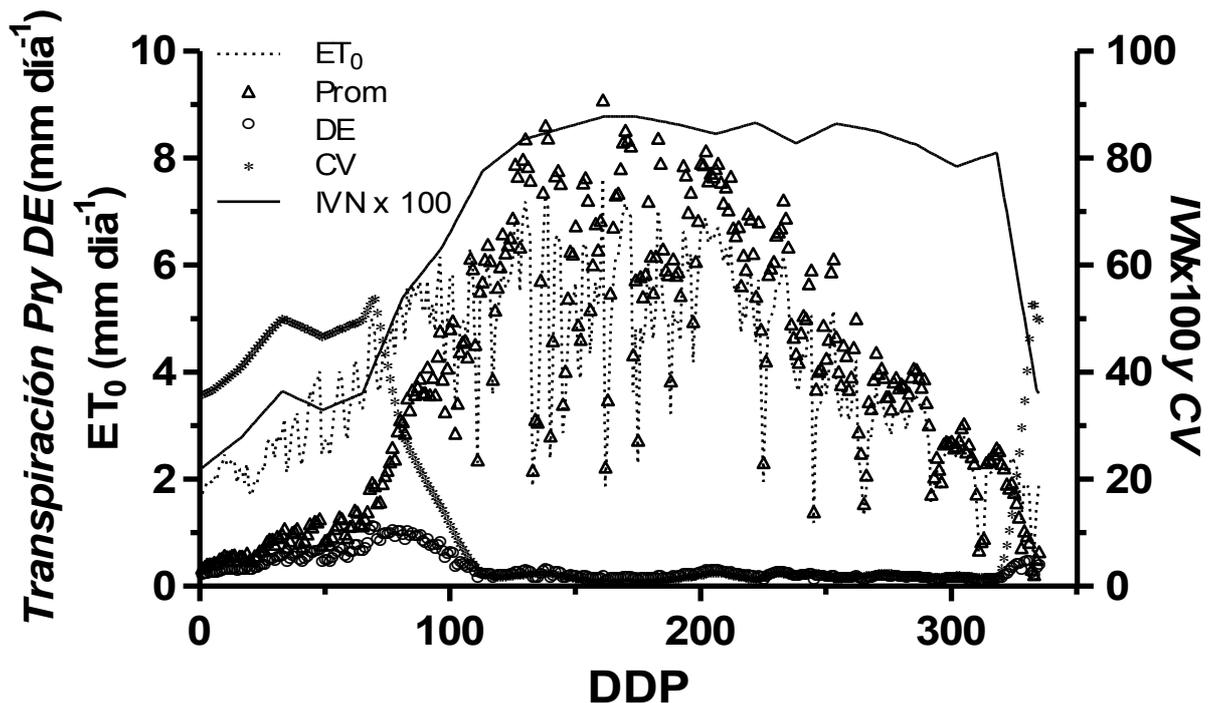


Figura 2.2. Dinámica temporal de la transpiración diaria (mm día^{-1}) (promedio, desvío estándar y coeficiente de variación), de la ET_0 y del IVN de una cultivo en el estadio soca 2 bajo riego (8 eventos por ciclo). Ciclo: 12/7/2002 - 11/06/2003. DDP corresponde a “días después de la plantación”.

etapa fue muy corta. En la otra situación (IVN mayor a 0,5) el CV cayó abruptamente, ya que mientras el DE se mantuvo relativamente constante, la transpiración promedio aumentó hasta 8 veces respecto a su valor original. Además, dado que el valor del DE durante esta etapa fue bajo (cerca de $0,2 \text{ mm día}^{-1}$), la variabilidad originada por el uso de los distintos modelos fue despreciable en comparación con la variabilidad temporal inherente a ambas ET_0 y t (el rango de variabilidad entre días sucesivos fue de hasta 5 ó 6 mm día^{-1}).

Se encontró una gran similitud entre los modelos 1 y 2 (Figura 2.3.a). Las pendientes del modelo ajustado y de la recta 1:1 no fueron estadísticamente distintas (test F, $p = 0,088$). Por el contrario, la ordenada al origen fue significativamente distinta de cero (test F, $p = 0,0001$), aunque su valor ($-13,1 \text{ mm ciclo}^{-1}$) fue despreciable en comparación con los niveles de transpiración estimados (rango $700\text{-}1700 \text{ mm ciclo}^{-1}$). El modelo 3 difirió de los modelos 1 y 2 (Figuras 2.3.b y c): en ambos gráficos la pendiente fue menor que 1 (test F, $p < 0,0001$) y la ordenada al origen fue cercana a 150 y 180 mm ciclo^{-1} , respectivamente. Sin embargo, para ambos modelos la sobrestimación fue de aprox. 100 y 30 mm ciclo^{-1} cuando el modelo 3 produjo estimaciones de t de entre 700 y 1500 mm ciclo^{-1} , respectivamente (i.e., 15% y 2%, respectivamente).

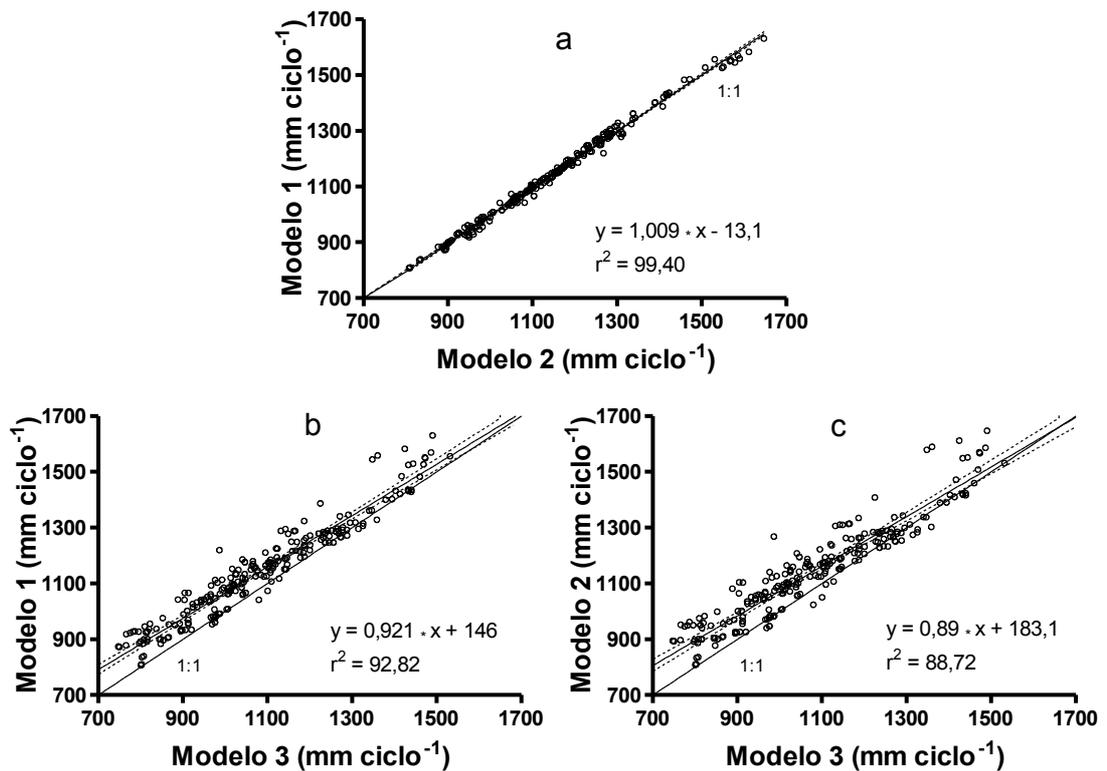


Figura 2.3. Regresión lineal entre las estimaciones de transpiración anual realizadas con los modelos: 1 y 2 (a), 1 y 3 (b) y 2 y 3 (c). Las líneas representan la recta 1:1, la recta de mejor ajuste y las bandas de confianza del 99% (líneas punteadas). Cada punto ($n=240$) representa el par de estimaciones realizadas con los dos modelos correspondientes, en un mismo lote y para una misma campaña.

Las diferencias entre las estimaciones realizadas con los modelos, tomados de a pares, indica para los modelos 1 y 2 que el 80% de los registros difirieron en menos de 20 mm ciclo⁻¹, mientras que para el 20% restante la diferencia fue de entre 20 y 39.9 mm ciclo⁻¹. Tanto al comparar el modelo 1 con el 3, como el 2 con el 3, la situación fue parecida: las primeras dos categorías (0-19.9 y 20-39.9 mm ciclo⁻¹) concentraron el 20 y el 15% de las estimaciones, respectivamente. Además, en ambos casos el 50% de los registros difirieron en menos de 60 mm ciclo⁻¹. Al agrupar a las comparaciones realizadas entre todos los modelos (barras negras) se observó que por lo menos un 60% de las estimaciones difirieron por menos de 20 mm ciclo⁻¹ y que para el 75% de las estimaciones las diferencias no superaron los 80 mm ciclo⁻¹.

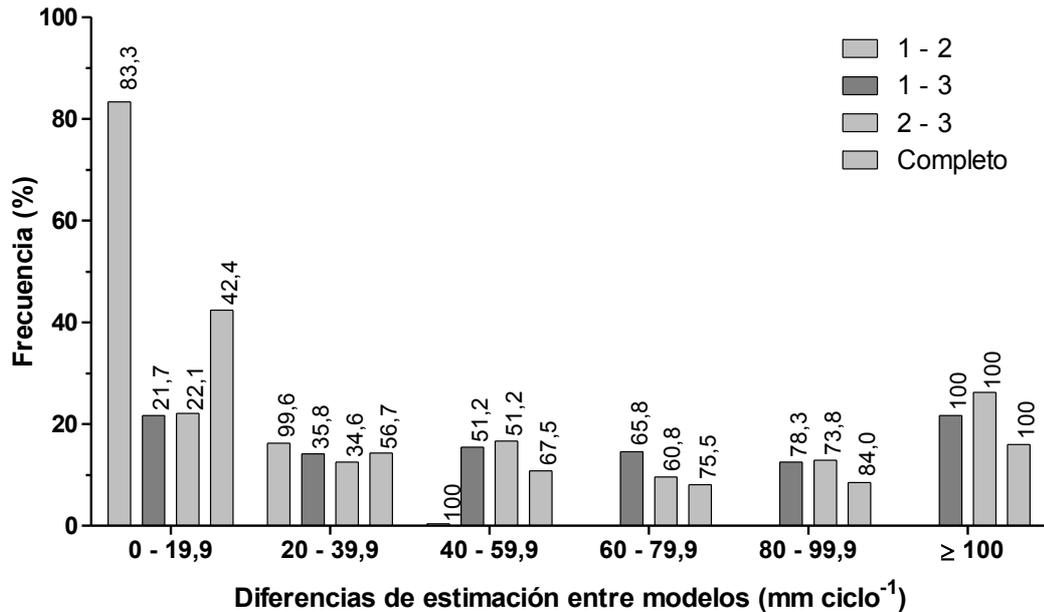


Figura 2.4. Distribución de frecuencias para las diferencias de transpiración (mm ciclo⁻¹) ocasionadas por el uso de los distintos modelos (comparación modelos: 1-2, barras con rayas horizontales; 1-3, barras cuadriculadas; 2- 3, barras con rayas oblicuas; barras negras, análisis reuniendo datos de las tres comparaciones), agrupadas en seis categorías. Los números sobre las barras indican la frecuencia acumulada.

2.4. DISCUSION

El valor mínimo de IVN obtenido es coherente con el límite inferior del rango de IVN informado para caña de azúcar por otros autores (Yang et al., 1996; Picoli, 2006; de Aguiar, 2007).

La relación directamente proporcional entre el K_{cb} (estimado con cualquiera de los tres modelos) y el IVN refleja la asociación causal que existe entre el área foliar y la transpiración del cultivo (Figura 2.1.a).

Las diferencias entre los modelos 1 y 2 (a niveles bajos de IVN , las estimaciones de K_{cb} fueron mayores con el modelo 2, situación que se invirtió a partir de un IVN aprox. igual a 0,7, figura 2.1) responderían a diferencias en las calibraciones de ambos modelos, debidas tanto al K_{cb} como al IVN . Así, para valores bajos de IVN , las mayores diferencias podrían responder a que los valores mínimos de IVN observados para caña de azúcar en la región de estudio (utilizados para calibrar el modelo 1) son superiores a los utilizados por Calera Belmonte et al. (2003) en la calibración del modelo 2. En este caso se desestima un efecto del K_{cb} , ya que los valores iniciales (cobertura de suelo desnuda o casi desnuda) de este parámetro no difieren entre la mayoría de los cultivos agrícolas (Allen 1998). En el otro extremo, para valores de IVN elevados, las diferencias seguramente se debieron tanto a los valores de K_{cb} máximo característicos de cada cultivo, como a los valores de IVN a los que se alcanza dicho valor. En relación con el comportamiento del modelo 3 (de tipo sigmoideo), en la etapa de crecimiento aproximadamente exponencial predomina la respuesta del IAF ante cambios de la fracción de cobertura, mientras que durante la etapa de crecimiento decreciente

predomina la respuesta de ambos K_{cb} y C_p ante modificaciones del IAF . Cuando se alcanzan los valores más altos de IVN la curva resulta truncada debido a que la fracción de cobertura se satura (alcanza la unidad), obteniéndose así los valores máximos de IAF , K_{cb} , C_p y, en función de éstos, el K_{cb} máximo.

Cuando se realizó el análisis de regresión entre los modelos 1 y 3 y entre los modelos 2 y 3 (gráficos 2.3.b y c, respectivamente) se observó que la nube de puntos sugiere que en ambos casos la pendiente podría tener un valor de 1. Por lo tanto, se repitió el análisis imponiendo esta restricción, ante la posibilidad de que un error de muestreo pudiera haber originado el patrón asimétrico de los residuales para valores altos de x . En el caso de los modelos 1 y 3, el valor de r^2 se mantuvo casi constante (92,14) y la ordenada al origen fue de 61,62 mm ciclo⁻¹ (+/- 6,22 mm ciclo⁻¹, IC 95%). Cuando se repitió el análisis de regresión para los modelos 2 y 3, se observó un r^2 de 87,36 y una ordenada al origen de 64,86 mm ciclo⁻¹ (+/- 7,8 mm ciclo⁻¹, IC 95%). Estos resultados indican que la sobrestimación de los modelos 2 y 3 sería constante e inferior a los 65 mm ciclo⁻¹ (0,18 mm diarios para un ciclo de 365 días), y aproximadamente el 9 y 4 % de las transpiraciones mínima y máxima absolutas registradas en este estudio (747 y 1647 mm ciclo⁻¹, respectivamente).

Distintos autores estudiaron el rango de variabilidad del agua consumida por el cultivo de caña de azúcar ante cambios en las variables ambientales y culturales, y hallaron que podía encontrarse en distintos rangos, como por ejemplo 770-1480 mm ciclo⁻¹ (Singh et al., 2007), 1300-1900 (Thompson, 1986, tomado de Inman-Bamber y McGlinchey, 2003), 1400-2500 (da Silva, 2009), 750-1250 (Figuroa et al., 2009) ó 1100-1800 mm año⁻¹ (Carr y Knox, 2011). En esta tesis, al comparar las estimaciones resultantes de los distintos modelos se encontró que las mayores diferencias fueron cercanas a 100 mm ciclo⁻¹, y resultan de la comparación de los modelos 1 y 2 con el modelo 3 (figura 2.3). Además, los resultados obtenidos al utilizar dichos modelos indican que algo más del 50% de las estimaciones difirieron en menos de 60 mm ciclo⁻¹ (figura 2.4). Considerando que se trata de las máximas discrepancias encontradas entre modelos, su comparación con la variabilidad documentada en la bibliografía sugiere que el uso de los modelos presentados permitiría estimar el consumo de agua por parte del cultivo de manera confiable.

Por último, se debe resaltar que las estimaciones realizadas en este capítulo no incluyeron las pérdidas de agua por evaporación, sino que únicamente se estudió el comportamiento de la transpiración. Esto se debe a que, por características del cultivo *per se* y también del manejo, el aporte de la evaporación a la ET es proporcionalmente bajo en comparación con la transpiración del cultivo. Así, la elevada área foliar del cultivo mantiene el suelo sombreado durante la mayor parte del ciclo de crecimiento, reduciéndose la energía disponible para el proceso de evaporación del agua edáfica (Denmead et al., 1997). Por otro lado, la época de menor área foliar del cultivo coincide mayoritariamente con el final del invierno y el principio de la primavera, de modo que cuando la radiación alcanza valores elevados el canopeo ya se encuentra desarrollado y sombrea el suelo. Además, los estadios soca (que representan como mínimo el 75% de los casos), debido a la mayor tasa de desarrollo del canopeo, presentan breves períodos de baja cobertura del suelo y de máxima evaporación si se los compara con el estadio caña planta. Otro aspecto importante es la conversión del sistema de cosecha de caña quemada a caña verde, que implica el retorno de grandes volúmenes de residuos al suelo, que también contribuyen a reducir la evaporación (Inman-Bamber y Smith, 2005). Como consecuencia, hay antecedentes que indican que la evaporación total del

cultivo de caña fue inclusive menor que la de sistemas de doble cultivo, como algodón-trigo, arroz-trigo y maíz-trigo (Jalota y Arora, 2002).

2.5. CONCLUSIONES

Las estimaciones de transpiración realizadas con el modelo parametrizado (modelo 1) difirieron de las de los otros dos modelos, obteniéndose las mayores diferencias al compararlo con el modelo 3. Sin embargo, la magnitud de tales discrepancias resulta de poca importancia por diversos motivos. Por ejemplo, la máxima variabilidad se observó para las clases de *IVN* menos representativas y observables durante sólo una cuarta parte del ciclo. Además, durante el período restante ambas t y ET_0 tuvieron una variabilidad diaria de hasta 6 mm día^{-1} , valor que resulta un orden de magnitud mayor que el DE asociado al uso de los tres modelos, por lo que es esperable que el aporte a la variabilidad total debido a la elección del modelo sea mucho menor que el que podría originarse por imprecisiones (mensurativas y/o analíticas) asociadas a la ET_0 . En este sentido, las sobrestimaciones extremas del modelo 1 (mínima y máxima de 15 y $100 \text{ mm ciclo}^{-1}$, que representan un promedio $0,04$ y $0,27 \text{ mm día}^{-1}$) resultan poco significativas en comparación con los niveles de ET_0 observados (ej. para una longitud de ciclo escogida aleatoriamente, los valores mínimo, máximo y promedio de ET_0 fueron $0,59$, $7,62$ y $4,02 \text{ mm día}^{-1}$, respectivamente).

Por lo tanto, se puede concluir que las estimaciones de transpiración de caña de azúcar podrían realizarse con cualquiera de los tres modelos presentados, obteniéndose un grado de incertidumbre bajo asociado a la elección del modelo y pequeño en comparación con el que podría originarse por otras fuentes de error. Por tal motivo, se recomienda la utilización del modelo 1, ya que el mismo surge de una calibración realizada sobre la base del comportamiento de la caña de azúcar creciendo en las condiciones ecológicas locales.

Capítulo 3

Relaciones entre las estrategias de manejo

y la transpiración

3.1. INTRODUCCION

Existen fuertes contrastes entre los requerimientos hídricos a lo largo del reino vegetal, los cuales dependen principalmente de las condiciones ambientales en que evolucionó cada especie (básicamente, del balance entre el agua disponible y la demanda atmosférica). Sin embargo, a pesar de tales diferencias, en todos los casos existe un vínculo directo entre la captación del dióxido de carbono atmosférico necesario para el crecimiento y la transferencia de agua desde la planta hacia la atmósfera. Esto responde a que ambos procesos se realizan a través de los estomas y, por otro lado, a que para la mayoría de las especies vegetales dichos intercambios ocurren simultáneamente, de modo que la captación de carbono involucra inevitablemente la pérdida de agua (Inman-Bamber y Smith, 2005). Este es el principal motivo por el cual las especies cultivadas, caracterizadas por la producción de grandes cantidades de biomasa, poseen elevados requerimientos hídricos.

La caña de azúcar es una de las especies cultivadas con mayores requerimientos hídricos (Jalota y Arora, 2002), lo cual se debe a la elevada cobertura edáfica presente durante la mayor parte del ciclo de cultivo, que finalmente conduce a niveles de transpiración máximos por períodos prolongados (Yates y Taylor, 1986; Romero et al., 2009). Por este motivo, en la mayoría de las regiones en que se cultiva la caña de azúcar, los sistemas de producción se basan en el uso de riego complementario (Robertson et al., 1999; Inman-Bamber y McGlinchey, 2003; Romero et al., 2009).

Las estrategias de manejo repercuten directamente sobre los requerimientos hídricos y la transpiración, ya sea por una modificación en la estructura del cultivo (por ejemplo del área foliar) o bien por cambios en la demanda atmosférica mediados por el calendario de manejo. Además, existe un efecto indirecto originado por ejemplo por cambios en el contenido de rastrojos en superficie, de la materia orgánica edáfica y/o por la compactación del suelo, que producen alteraciones en el balance hídrico y repercuten sobre el contenido de agua disponible para el cultivo (Denmead et al., 1997; Bell et al., 2001). Por lo tanto, cuantificar el uso de agua (la transpiración) para las principales variantes de manejo permitiría planificar el manejo de manera que la demanda regional -a nivel de ingenio o de cuenca, por ejemplo- sea acorde con las existencias de agua en los ríos y reservorios y, además, compatible con otros usos (Haddeland et al., 2006; Guo et al., 2008). También permitiría lograr una aproximación más precisa a la necesidad real de riego, evitando la ocurrencia de déficits y excesos, y sus respectivas consecuencias negativas tanto para el cultivo como para el ecosistema.

Por lo tanto, los objetivos de este capítulo fueron, por un lado, cuantificar el rango de valores que adquiere la transpiración total del ciclo en el sistema bajo estudio. Además, se pretendió estudiar su respuesta ante cambios en determinadas variables culturales, e identificar qué variables la afectan de manera extrema. Para alcanzar estos objetivos la transpiración diaria se estimó utilizando el modelo parametrizado en el capítulo previo. Luego, ésta fue corregida en función del estrés hídrico experimentado por el cultivo, estimado a partir de un balance hídrico edáfico. Finalmente los valores de transpiración diaria corregida fueron integrados para todo el ciclo de cultivo, obteniéndose así la transpiración total del ciclo.

3.2. MATERIALES Y METODOS

3.2.1. Zona de estudio y manejo del cultivo

Para ver la descripción de las principales características del clima de la región en estudio y de las estrategias de manejo del cañaveral, remitirse al capítulo 2.

3.2.2. Descripción de la base de datos y de los parámetros meteorológicos

En líneas generales, tanto la base de datos como los parámetros meteorológicos analizados presentaron las mismas características que aquellos utilizados para realizar el estudio del capítulo 2. Por lo tanto, su descripción se encuentra en la sección materiales y métodos de dicho capítulo. Respecto a la cantidad de datos analizados, el árbol de clasificación y regresión se construyó a partir de un total de 217 registros. En el caso de las técnicas complementarias a dicho árbol el número dependió de la variable en cuestión (ver Tabla 3.1).

3.2.3. Estimación de la transpiración

Resumidamente (el detalle de la metodología se encuentra en la sección materiales y métodos del capítulo 2), en primer lugar se estimó la evapotranspiración de referencia diaria (ET_0) con la metodología propuesta por Priestley y Taylor (1972). Luego, ésta fue multiplicada por la suma entre el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y el coeficiente de evaporación directa del suelo (K_e), lo que condujo al valor de evapotranspiración diaria del cultivo para condiciones estándar, en ausencia de limitantes ambientales (ET_c) (Allen et al., 1998). Como la evaporación edáfica fue despreciada (ver justificación presentada en el capítulo 2), este último paso condujo a la estimación de la transpiración diaria del cultivo. Para incorporar el efecto de una ocasional restricción hídrica sobre la transpiración, el valor de K_{cb} fue multiplicado por el coeficiente de estrés hídrico (K_s), obteniéndose así el valor de transpiración diaria ajustada. El valor del K_s se obtuvo a partir del cómputo de un balance hídrico diario estimado para la profundidad del perfil explorada por las raíces (actualizada conforme fue aumentando la profundización de enraizamiento), y se incluyeron ingresos originados por precipitación e irrigación, y egresos ocasionados por transpiración y percolación profunda. La estimación de K_{cb} se realizó utilizando la función parametrizada en el capítulo 2 y basada en el índice verde normalizado (IVN). La información de IVN fue obtenida de imágenes satelitales capturadas por el sensor MODIS, utilizándose una imagen cada 16 días durante el período 2001-2005. Luego, los valores de IVN fueron convertidos a una frecuencia diaria por interpolación lineal para hacerlos compatibles con el balance hídrico. Finalmente, se obtuvo una estimación diaria de la transpiración del cañaveral (a partir del producto entre la ET_0 y el K_{cb}), la cual fue reducida en base al valor de K_s cada vez que el contenido hídrico edáfico cayó por debajo de determinado umbral, de acuerdo con los resultados del balance hídrico edáfico. La transpiración total del ciclo se calculó integrando los valores de transpiración diaria para toda la duración del ciclo de cultivo. El ATD se calculó como la suma de las precipitaciones ocurridas durante el ciclo de cultivo y de los aportes de agua por irrigación.

3.2.4. Análisis de los resultados

Arboles de clasificación y regresión. Se trata de una metodología de minería de datos (o *data mining*) no paramétrica conocida como CART (del inglés, *classification and regression trees*) y constituye una variante de las técnicas de análisis multivariado. Con esta herramienta se pueden identificar relaciones implícitas entre una variable respuesta, sea categórica o continua, y numerosas variables predictoras, las cuales también pueden ser categóricas o continuas. Tiene la ventaja de permitir analizar bases de datos grandes y complejas, con relaciones no lineales, interacciones entre múltiples factores, datos faltantes, a lo que se debe agregar la facilidad para interpretar los resultados. La operatoria del modelo es como sigue (Breiman et al., 1984). Los datos son ordenados en un gráfico con forma de árbol, el que es construido comenzando por un extremo en que están todos los registros conformando un único grupo (nodo inicial, figurativamente, la “raíz”). Luego, este grupo es particionado de manera dicotómica (figurativamente, una ramificación del árbol) originándose así dos nuevos grupos o nodos, donde los datos que conforman cada nodo tienen más probabilidades de ser asignados al grupo al que pertenecen que a aquel del que provienen o bien al otro grupo resultantes del proceso de clasificación. Conforme va construyéndose el árbol, la heterogeneidad intranodo es máxima en el nodo inicial y disminuye en dirección a la punta de las ramas, al tiempo que aumenta la heterogeneidad internodos en esta misma dirección. En un primer paso, el proceso de clasificación extrae toda la información posible de la base de datos (incluida la variación que no es originada por las variables predictoras -“ruido”-), resultando en un árbol desproporcionadamente grande. Luego, con el objetivo de reducir su complejidad, éste es “podado” desde los extremos de las ramas hacia la raíz, hasta alcanzar un árbol de menor tamaño pero prácticamente con la misma capacidad predictiva. En este análisis se utilizó la técnica de poda por error de clasificación (*misclassification error*), con un umbral de una desviación estándar del error relativo mínimo (Breiman et al., 1984). La validación del árbol construido se realizó por validación cruzada. Para ello, el set de datos fue dividido aleatoriamente en 3 subgrupos de igual tamaño. Entonces, uno de los subgrupos (llamado el *test set*) se utilizó para evaluar el árbol que se creó utilizando los subgrupos restantes (llamados conjuntamente set de entrenamiento o aprendizaje). Luego, este procedimiento se repitió dos veces más, usando en cada oportunidad a uno de los subgrupos restantes como *test set*. De este modo, se obtuvieron tres estimaciones del error de clasificación (representados por el costos de validación cruzada, *CV cost*), las cuales fueron promediadas para obtener el valor representativo de cada árbol (donde cada árbol fue el resultante de las sucesivas instancias de poda aplicadas sobre el árbol original). La técnica de CART provee dos tipos de información. Un tipo es el que caracteriza a cada nodo y consiste en: el valor medio de la variable respuesta en el nodo en cuestión, la cantidad de observaciones que lo conforman y, por último, la trayectoria recorrida desde el nodo inicial (esto es, los criterios de clasificación involucrados a lo largo de dicha trayectoria). El otro tipo de información es el ranking de importancia de las variables predictoras, que representa su contribución relativa a la definición de la estructura global del árbol. Para estimar la importancia de cada variable el primer paso consiste en calcular su contribución en la separación del nodo inicial. Luego, este procedimiento se repite con cada variable y para el resto de los nodos que conforman al árbol. Finalmente, se calcula la contribución global de cada variable, la que surge de la suma de la contribución correspondiente a cada nodo. En este capítulo, la variable respuesta fue la transpiración del cañaveral a lo largo de todo el ciclo de cultivo (mm ciclo^{-1}), y se incluyeron ocho variables predictoras: año de zafra, variedad de caña cultivada, época de plantación de la “caña

semilla” (adquiere el mismo valor para todos los estadios comprendidos desde la plantación hasta la renovación del cañaveral), longitud del ciclo de cultivo (número de días transcurridos desde la plantación hasta la cosecha para el caso del estadio de caña planta, o bien entre dos cosechas sucesivas en el caso de estadios soca), mes de inicio del ciclo de cultivo (para caña planta se corresponde con el mes de plantación, mientras que en el caso de los estadios soca su valor coincide con el mes de cosecha del ciclo previo), mes de cosecha, edad del cañaveral y asignación de riego invernal (número de eventos por ciclo, donde se asume que el suelo queda en capacidad de campo luego de cada evento de riego) (Tabla 3.1). El análisis se efectuó con el software *STATISTICA* (StatSoft, Inc., 2007).

Técnicas de análisis complementarias al CART. En base al análisis de CART se seleccionaron aquellas variables que recibieron mayor puntuación por su contribución relativa al armado del árbol y se estudió el efecto de cada una de éstas, tomada de manera aislada, sobre la transpiración. En el caso de la longitud del ciclo de cultivo (variable continua) se realizó un análisis de regresión lineal simple. En el caso de las variables discretas, se realizó un análisis de la varianza a una vía. Los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianza se evaluaron con las pruebas de Shapiro-Wilks y de Levene, respectivamente, transformando previamente los datos cuando fue necesario. Cuando, a pesar de las transformaciones, no se cumplió el supuesto de homogeneidad de varianza se aplicó la corrección de Welch. En cualquiera de estos casos, las comparaciones múltiples o *pruebas a posteriori* se realizaron con la prueba de Tukey (o Tukey-Cramer, cuando los tamaños de muestras fueron desiguales). Si los datos no seguían una distribución normal se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, en cuyo caso las comparaciones múltiples se hicieron mediante el método de Dunn. El nivel de significancia considerado fue del 5% en todos los casos. Ante el incumplimiento de ambos supuestos, se realizó un análisis descriptivo de los datos utilizando un gráfico de cajas (*box plot*), donde los bigotes representan los valores extremos superior e inferior.

Tabla 3.1. Descripción de las variables predictoras utilizadas en los árboles de clasificación.

Variable	Tipo	Niveles	<i>n</i> ^a
Zafra	Categórica	2002	53
		2003	55
		2004	53
		2005	53
Variedad ^b	Categórica	1 (CP 68 350)	21
		2 (CP 70 1133)	15
		7 (NA 84 3920)	60
		8 (NA 85 1602)	47
		9 (TUC 72 16)	11
		10 (TUC 77 42)	49
Epoca de plantación	Categórica	Invierno	139
		Verano	75
Mes de inicio	Categórica	2 (febrero)	11
		3 (marzo)	8
		6 (junio)	12
		7 (julio)	32
		8 (agosto)	69
		9 (septiembre)	39
	10 (octubre)	32	

		11 (noviembre)	11
Mes de cosecha	Categoría	5 (mayo)	11
		6 (junio)	22
		7 (julio)	42
		8 (agosto)	60
		9 (septiembre)	24
		10 (octubre)	35
Edad	Categoría	11 (noviembre)	20
		0 (caña planta)	47
		1 (soca 1)	49
		2 (soca 2)	51
		3 (soca 3)	37
		4 (soca 4)	9
		5 (soca 5)	10
Riego invernal (eventos)	Categoría	7 (soca 7)	11
		0	78
		1	63
		2	42
		3	18
Longitud de ciclo	Categoría	4	13
		358 (336-390) ^c	231

a Número de parcelas incluidas en cada nivel

b El nombre de la variedad se presenta entre paréntesis

c Los números representan la mediana y el rango intercuartílico, presentado entre paréntesis.

3.3. RESULTADOS

El árbol de clasificación obtenido presentó 6 nodos terminales, cada uno de los cuales constituye un grupo de parcelas que difieren en su respuesta (expresada como transpiración total) a las distintas variables estudiadas (Figura 3.1). En primer lugar, la clasificación de los datos se realizó en base a la longitud del ciclo de cultivo: el árbol se ramificó agrupando a la derecha a los cañaverales cuya duración fue superior a 517 días, y a la izquierda a las parcelas con un ciclo menor o igual a 517 días. Al primer grupo no se lo volvió a dividir, conformando así un nodo terminal caracterizado por una transpiración de 1655 mm ciclo⁻¹. Continuando con la rama izquierda (que contiene a los registros con ciclo menor o igual a 517 días), ésta fue clasificada en función del mes de inicio del ciclo de crecimiento: la rama de la derecha (correspondiente a los meses junio, julio o agosto) conformó un nuevo nodo terminal con una transpiración promedio de 1243 mm ciclo⁻¹. La rama izquierda (parcelas cuyo ciclo se inició en septiembre, octubre o noviembre) fue clasificada en base a la edad, separándose por la izquierda a los cultivos de edad 0 (estadio caña planta), los cuales conformaron un nuevo nodo terminal, y por la derecha se agruparon el resto de las parcelas (1 a 7 años de edad -estadios soca-). Luego, los últimos se clasificaron en base a una longitud de ciclo umbral de 376 días: los cañaverales con ciclo mas largo (que formaron un nodo terminal) tuvieron una transpiración promedio de 1224 mm ciclo⁻¹, mientras que cuando el ciclo fue menor a dicho umbral volvieron a clasificarse según hayan sido o no cosechados en el mes de noviembre. Esto resultó en dos nuevos nodos terminales, habiéndose clasificado así a todos los registros de la base de datos. Los dos grupos con niveles de transpiración extremos fueron: a) aquel con el mayor valor promedio (1655 mm ciclo⁻¹), conformado por cañaverales cuyo ciclo fue superior a 517 días; y b) el

grupo con menor transpiración promedio (913 mm ciclo⁻¹), representado por parcelas cuyo ciclo es inferior a 517 días, que iniciaron el ciclo de crecimiento durante el período septiembre-octubre-noviembre y que están en el estadio caña planta. La medida de dispersión con que se caracteriza al árbol es la varianza promedio (i.e., el promedio de la varianza obtenida en cada nodo) y tuvo un valor igual a 11746.

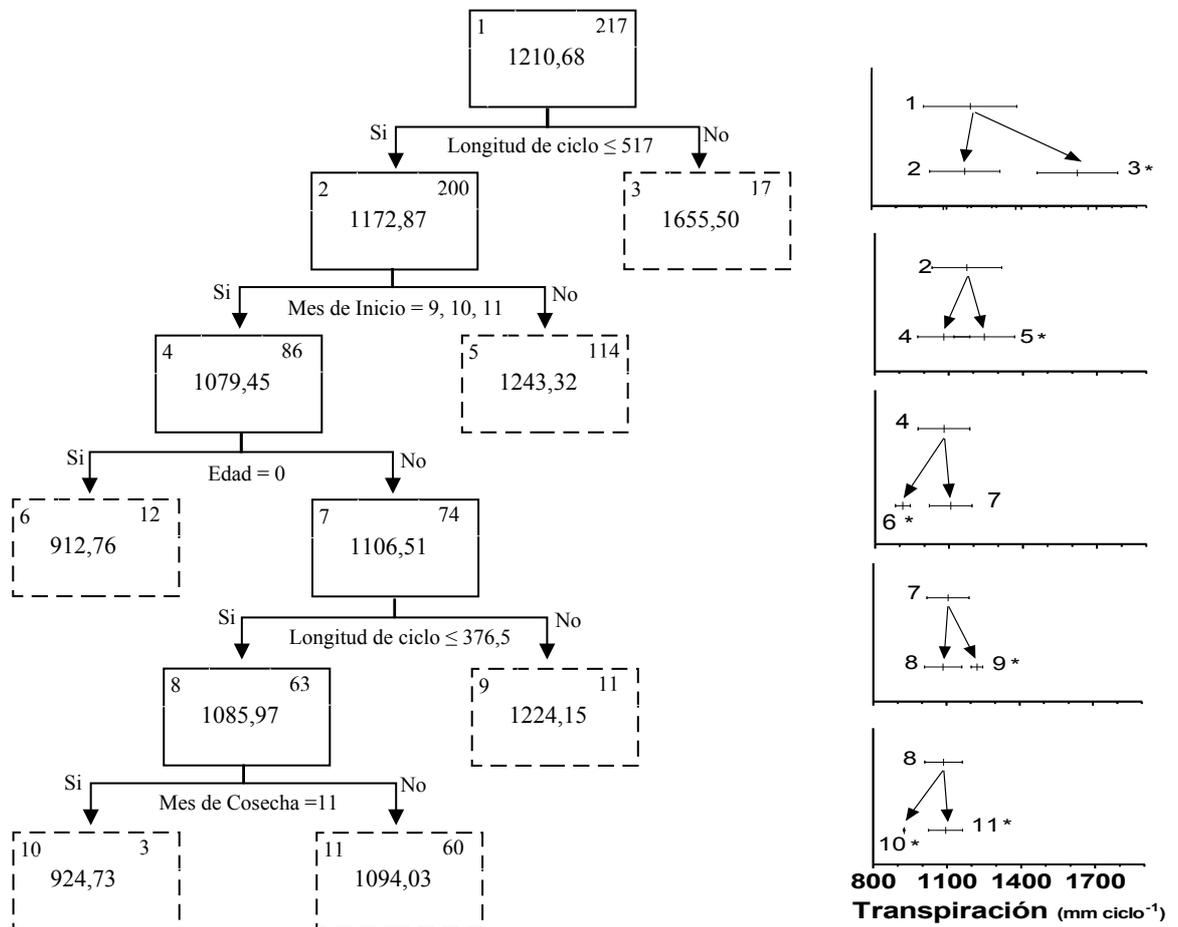


Figura 3.1. Árbol de clasificación obtenido para los datos de transpiración del cañaveral. En cada nodo (intermedios recuadrados con línea continua, terminales recuadrados con línea punteada) se indica el número identificador (vértice superior izquierdo), la cantidad de parcelas que lo representan (vértice superior derecho) y la transpiración media (mm ciclo⁻¹, centro del nodo). Para cada nodo intermedio se presenta el criterio de clasificación, mientras que “si” y “no” representan la agrupación de los registros según cumplan (o no) con ésta condición. Los gráficos de la derecha representan para cada nivel de clasificación la transpiración (promedio \pm 1 desvío estándar) de los nodos madre y de los nodos hijos resultantes (un asterisco identifica a los nodos terminales).

La variable de mayor importancia para estructurar al árbol de clasificación fue la longitud del ciclo, seguida por el mes de inicio del ciclo de cultivo (Figura 3.2). Además, como ya se mencionó, ambas variables estuvieron involucradas en los primeros niveles de clasificación del árbol de la figura 3.1. Las variables que siguieron

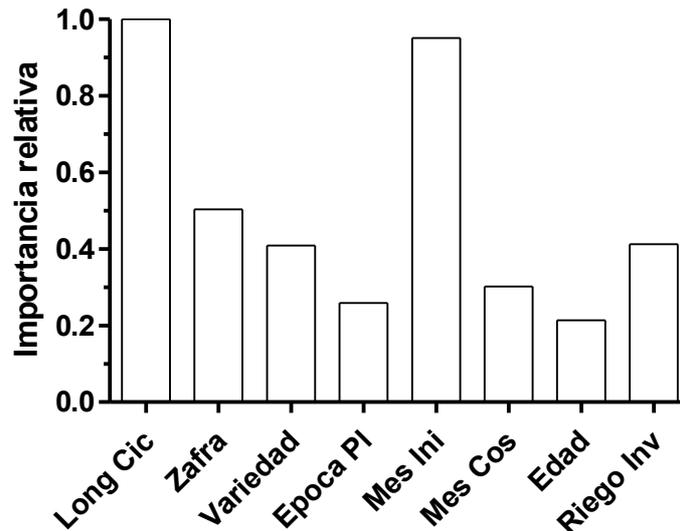


Figura 3.2. Ranking de importancia de las ocho variables que intervienen en la construcción del árbol de clasificación.

en importancia a la longitud del ciclo y el mes de inicio fueron el año calendario de cultivo, la variedad de caña de azúcar y el riego invernal. Sin embargo, su contribución en el armado del árbol fue notablemente menor.

A continuación, en base a la figura 3.2 se seleccionaron las cinco variables con mayor importancia en la elaboración del árbol de clasificación y se analizó el efecto individual de cada una de estas sobre la transpiración.

La longitud del ciclo estuvo directa y linealmente asociada con la transpiración del cañaveral (figura 3.3.a): por cada día que se alargó el ciclo, el modelo ajustado predijo un incremento de la transpiración de 3,13 (+/- 0,025) milímetros ciclo⁻¹ ($R^2 = 0,4123$). En los casos en que el ciclo fue superior a los 450 días el modelo ajustado sobrestimó la transpiración estimada para el cañaveral. Cuando se estudió el efecto del mes de inicio del ciclo de cultivo se encontró que los cañaverales que iniciaron su crecimiento durante febrero y marzo (i.e., renovados durante el verano) presentaron los valores de transpiración más altos (figura 3.3.b), los cuales superaron hasta en un 30% a los demás meses considerados. Además, cuando el ciclo se inició entre los meses de junio y noviembre, la transpiración fue significativamente mayor al comienzo del período (los promedios están entre 1220 y 1344 mm ciclo⁻¹ para el período junio-agosto y entre 1106 y 1052 mm ciclo⁻¹ para septiembre-noviembre).

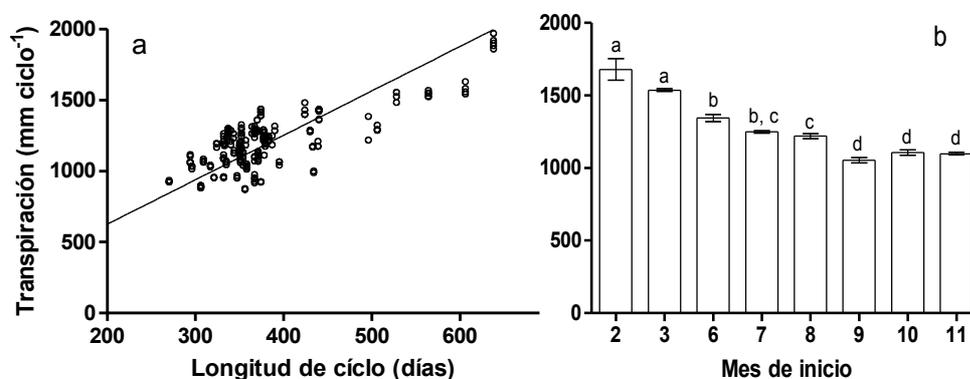


Figura 3.3. **a)** Transpiración total (mm ciclo⁻¹) en función de la longitud del ciclo de cultivo de caña (n=231). Modelo calibrado: $y = 3.131 * x$ ($R^2 = 0,4123$, error estándar de la pendiente 0,025). **b)** Transpiración total promedio (+/- 1 EE) (mm ciclo⁻¹) en función del mes de inicio del ciclo de cultivo. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, Welch ANOVA).

El año de zafra también influyó sobre el consumo de agua del cañaveral (figura 3.4.a): la transpiración correspondiente a las zafras 2004 y 2005 fue significativamente mayor que la estimada para los años 2002 y 2003. Al analizar el efecto de la variedad de caña de azúcar sobre la transpiración se encontró que los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad ni de homogeneidad de varianzas, por lo que se realizó únicamente un análisis exploratorio de los mismos (figura 3.4.b). Si bien las estimaciones de todas las variedades estuvieron parcialmente superpuestas, las variedades *CP 68 350*, *NA 84 3920* y *TUC 77 42* (1, 7 y 10, respectivamente) ocuparon la franja de mayor transpiración. El comportamiento más estable le correspondió a la variedad *TUC 77 42*, ya que tuvo la menor variabilidad intercuartílica, representada entre los cuartiles 25% y 75%. Sin embargo, al considerar a los valores atípicos (los que están por fuera del rango intercuartílico) este genotipo fue el de mayor variabilidad, superior a los 1000 mm ciclo⁻¹. Como consecuencia, al comparar a todas las variedades, los registros de *TUC 77 42* se ubicaron tanto en el extremo inferior como superior del rango de transpiración estimado en este capítulo. En el otro extremo, la transpiración de las variedades *CP 70 1133* y *NA 85 1602* (variedades 2 y 8, respectivamente), si bien estuvo parcialmente superpuesta con la de otras variedades, se diferenció por ocupar la franja de menor transpiración.

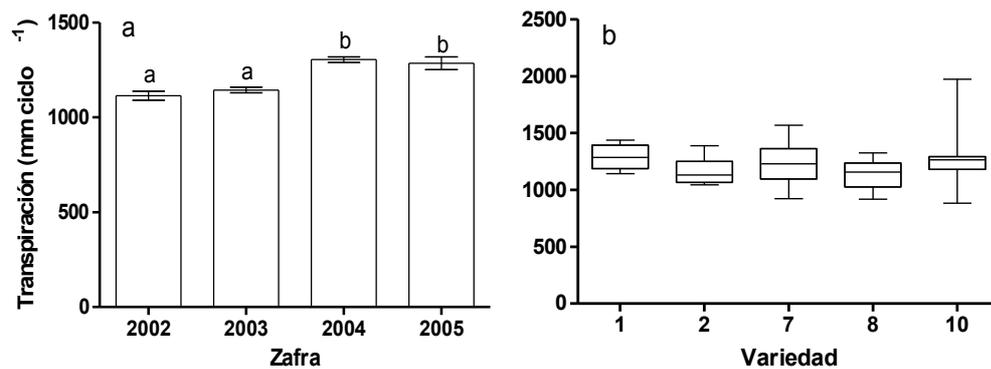


Figura 3.4.a) Transpiración total promedio ($\pm 1 EE$) (mm ciclo⁻¹) estimada para las zafras 2002, 2003, 2004 y 2005. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,01$, Welch ANOVA). b) Transpiración total (mm ciclo⁻¹) en función de la variedad de caña cultivada. Para cada variedad, la caja muestra la mediana y ambos cuartiles inferior y superior, mientras que los bigotes muestran los valores mínimo y máximo. Las variedades son: 1 *CP 68 350*; 2 *CP 70 1133*; 7 *NA 84 3920*; 8 *NA 85 1602*; 10 *TUC 77 42*.

Por último, ante la presunción de que condiciones de anaerobiosis edáfica transitoria pudieran alterar el normal funcionamiento del sistema radical, repercutiendo sobre el uso del agua, se evaluó el comportamiento del cultivo ante asignaciones crecientes de riego invernal (Figuras 3.5.a y 3.5.b). Debido a que los datos no cumplieron ninguno de los supuestos del ANOVA, se realizó un análisis exploratorio basado en un gráfico de caja y bigotes.

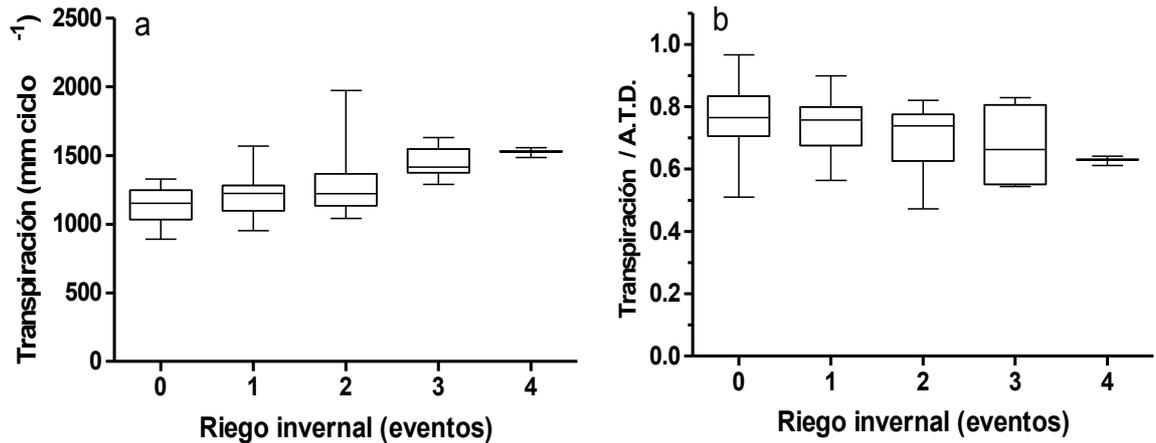


Figura 3.5. **a)** Transpiración total del cañaveral (mm ciclo^{-1}) en función de la cantidad de eventos de riego invernall aportados durante el ciclo de cultivo. **b)** Cociente entre la transpiración total y el agua total disponible (ATD) para el cultivo en función de la cantidad de eventos de riego invernall. En ambos gráficos, las cajas muestran la mediana y ambos cuartiles inferior y superior, mientras que los bigotes representan los valores mínimo y máximo.

En la figura 3.5.a se observa una tendencia al aumento de la transpiración del cultivo en respuesta a un mayor número de eventos de riego invernall, lo que se refleja por un incremento tanto de las medianas como de los valores mínimos observados en cada nivel de riego invernall. A diferencia de lo observado con la transpiración, el aprovechamiento del agua disponible para el cultivo sí habría disminuido conforme fue incrementándose el riego invernall (figura 3.5.b). Así, al comparar el uso del agua en ausencia de riego invernall y cuando se efectuaron tres eventos de riego por ciclo se observó que los valores extremos superiores cayeron de un 95% a menos del 85%, la mediana se redujo del 75 al 65% y el rango de valores más frecuentes (i.e., rango intercuartílico) pasó de 70-85% a 55-80%, respectivamente. En el otro extremo, los menores valores de aprovechamiento estuvieron en torno del 50% independientemente del riego invernall, de modo que ante cualquier esquema de riego invernall se puede estar desperdiciando la mitad del agua que está disponible para el cultivo.

3.4. DISCUSION

Los niveles de transpiración mínima y máxima estimados (913 y $1655 \text{ mm ciclo}^{-1}$, correspondientes a los grupos 6 y 3, respectivamente) son coherentes con los valores recopilados de la bibliografía. Singh et al. (2007) encontraron que el agua utilizada por el cultivo en India, bajo un clima subtropical semiárido estuvo entre 770 - $1480 \text{ mm ciclo}^{-1}$ ante distintas estrategias de riego, características edáficas y edades del cultivo. Por otro lado, en Sud Africa, la evapotranspiración medida utilizando lisímetros fue de 1300 y $1900 \text{ mm ciclo}^{-1}$ en los estadios caña planta y soca 1, respectivamente (Thompson, 1986, tomado de Inman-Bamber y McGlinchey, 2003). Da Silva (2009) estimó un nivel de evapotranspiración igual a 1700 mm para el estadio soca y bajo riego, en el valle del río San Francisco (San Pablo, Brasil). En la Provincia de Tucumán (Argentina) la evapotranspiración máxima fue de entre 750 y $1250 \text{ mm ciclo}^{-1}$ (Figueroa et al., 2009). Si bien los valores reportados por Figueroa et al. (2009) corresponden a un

área cercana a la zona bajo estudio en esta tesis, los fuertes contrastes ambientales (clima, suelos, etc.) y de prácticas culturales que caracterizan a la región del NOA en general, y a la Provincia de Tucumán en particular, no permiten establecer una comparación muy rigurosa entre los respectivos consumos de agua. Por último, Carr y Knox (2011) hicieron una recopilación bibliográfica específica de caña de azúcar y encontraron que el agua total utilizada por el cultivo, expresada en base anual, fue de entre 1100 y 1800mm.

Al comparar la precipitación media anual (800 mm) con los valores extremos de transpiración estimados en este capítulo, surge que para un año promedio el cultivo requiere la asignación de riego complementario, independientemente de la estrategia de manejo aplicada. En este sentido, la lámina a irrigar puede adquirir valores muy contrastantes, de entre 100 y 800 mm ciclo⁻¹ (sin considerar las necesidades extras originadas por las ineficiencias del sistema de irrigación), lo que puede tener implicancias muy diversas sobre los reservorios de agua y el ecosistema en su conjunto (ver capítulo 5).

La longitud de ciclo y el mes de inicio del ciclo de cultivo fueron las variables de mayor importancia para estructurar al árbol de clasificación. Si bien las mismas están correlacionadas (cuando el inicio de ciclos ocurrió en febrero y marzo tienen una duración de 500 a 638 días, mientras que para los restantes meses la duración es de 300 a 430 días de duración-), es de esperar que esta influencia no se manifieste en el árbol de clasificación ya que cuando interviene el mes de inicio (particionando al nodo 2), lo hace sobre cañaverales de ciclo corto (menor a 517 días), que incluyen solo al 10% de los registros correspondientes a renovaciones de febrero o marzo. Por lo tanto, el efecto del mes de inicio en el árbol de clasificación respondería a otras cuestiones, probablemente fenológicas, originadas por ejemplo por un contraste entre las condiciones meteorológicas de las distintas épocas en que puede iniciarse el ciclo. Al contrastar estos resultados con los antecedentes sobre factores que afectan el rendimiento de caña se puede concluir que ambos procesos responden a distintos controles. Así, la edad del cañaveral, con un fuerte efecto negativo sobre el rendimiento de caña (Magarey, 1996; Bull, 2000; Ghera et al., 2006), e identificada como uno de los factores con mayor influencia sobre el rendimiento de caña en Ledesma (Ferraro et al., 2009), fue el factor que menos influyó sobre la transpiración (Figura 3.2). Esto sugiere que la pérdida de rendimiento que ocurre conforme envejece el cultivo no se explicaría por una reducción de la transpiración, consecuencia por ejemplo del envejecimiento y disfunción del sistema radical. Por otro lado, mientras la duración del ciclo de cultivo fue uno de los factores con menor influencia sobre el rendimiento (Ferraro et al., 2009), en este estudio resultó ser el factor que más afectó la transpiración.

En cuanto al efecto individual de la longitud de ciclo sobre la transpiración (figura 3.3.a), la relación positiva entre ambas variables podría deberse principalmente a dos motivos. Por un lado, ciclos más largos conducen a la suma de mayor cantidad de días durante los cuales el cultivo está transpirando. Esto, asumiendo valores medios de transpiración diaria, y considerando que la duración del ciclo puede diferir en hasta 300 días, seguramente se traduce en un aumento de la transpiración total. Por otro lado, conforme se alarga el ciclo se produce un progresivo aumento del área foliar, con lo cual aumentan simultáneamente la densidad estomática por hectárea y la cantidad de radiación solar interceptada y disponible para evaporar el agua de los tejidos, contribuyendo a un incremento de la transpiración por hectárea (Inman-Bamber y

McGlinchey, 2003; da Silva, 2009). Este último efecto podría verse interrumpido cuando se alcanzan los valores máximos de *IAF*, manifestándose finalmente como una saturación de la respuesta de la transpiración del cultivo, la cual podría explicar la sobrestimación del modelo para longitudes superiores a los 450 días. Por otro lado, Ferraro et al. (2009) estudiaron los controles del rendimiento del cultivo de caña y encontraron que, entre un total de ocho factores, la duración del ciclo fue uno de los de menor importancia. Estos resultados, analizados conjuntamente con el patrón de la figura 3.3.a, sugieren que incrementos de la longitud del ciclo no conducirían a una mayor eficiencia en el uso del agua (estimada como el cociente entre el rendimiento y el agua transpirada), ya que el aumento en la transpiración observado en la figura no estaría acompañado de una tendencia positiva del rendimiento.

Para tratar de entender el efecto del año de zafra (figura 3.4.a) se analizó la dinámica de algunas variables meteorológicas (como la precipitación anual, la cantidad de días por año con heladas o la radiación solar) (datos no presentados), pero no se encontró un patrón interanual que pueda asociarse a este comportamiento. Por el contrario, al estudiar la influencia de los factores de manejo del cultivo se encontró que la mayor proporción de los registros de las zafras 2002 y 2003 presentaron valores de longitud de ciclo y de mes de inicio del ciclo de cultivo característicos de menores niveles de transpiración (datos no presentados). Este resultado sugiere que el efecto de la zafra podría explicarse, al menos parcialmente, por el efecto indirecto de la longitud de ciclo y el mes de inicio. Debido a que se estudió una serie temporal de solo cuatro años, no fue posible evaluar si este incremento forma parte de una tendencia temporal creciente y estable que refleja un cambio en las prácticas de manejo.

El efecto del genotipo sobre la transpiración del cañaveral no está estudiado en el NOA, pero la bibliografía internacional indica que sí existe una relación entre ambos (Olivier y Singels, 2003; Inman-Bamber y Smith, 2005; Singh et al, 2006; Carr y Knox, 2011). Entonces, en función de los resultados obtenidos y de los antecedentes, resulta prioritario iniciar estudios para profundizar en el conocimiento del comportamiento de las distintas variedades y como así también de los mecanismos involucrados. Respecto a los resultados de esta tesis, de las tres variedades que alcanzaron los niveles más altos de transpiración, dos de ellas (*TUC 77 42* y *NA 84 3920*) se caracterizaron por tener las longitudes de ciclo más altas de toda la base de datos, resultado que confirma una vez más la fuerte influencia que ejerce este factor sobre la transpiración. Estos resultados indican que la elección de la variedad de cultivo, conjuntamente con el conocimiento de su interacción con otras estrategias de manejo, como la longitud del ciclo, constituye una herramienta que permitiría intervenir sobre el nivel de transpiración del cultivo.

La posible relación directa entre la transpiración y el riego invernal (figura 3.5.a) sugiere que el incremento de la humedad edáfica invernal no comprometió al uso del agua por parte del cultivo. Para evaluar si esto respondería a que no se alcanzan condiciones de anaerobiosis se repitió el análisis incluyendo solamente a las parcelas con los mayores aportes de riego anual (donde se esperaría que la suma de éstos y del aporte invernal efectivamente conduzca a excedentes hídricos). Sin embargo, se observó la misma respuesta, lo que indicaría que dicho comportamiento ocurre incluso en condiciones de anaerobiosis en la rizósfera. Otra posibilidad es que, pese a la ocurrencia de condiciones anaeróbicas, se restablezca el normal funcionamiento radical durante la primavera (permitiendo así utilizar el agua edáfica transferida desde el invierno) o bien que el sistema radical no se viera afectado y las plantas continúen transpirando. Varios antecedentes respaldan esta última hipótesis (Webster y Eavis, 1971; Gupta y Yadav,

1995; Chabot et al., 2002) e indican que uno o más factores, como la profundidad, la duración y/o la etapa ontogénica en que ocurre el anegamiento, pueden influir sobre la respuesta de la transpiración del cultivo. En cuanto a la respuesta del rendimiento a las condiciones de anaerobiosis, se encontró que depende de diversos factores, como por ejemplo el genotipo, la profundidad a la que se produce el anegamiento y el tiempo de exposición al mismo, la calidad del agua, el tipo de suelo, entre otros (Gosnell, 1973; Obreza et al., 1998; Hurst et al., 2004). Tanto en el caso de la respuesta de la transpiración como del rendimiento, el efecto del anegamiento se manifestó con resultados contradictorios producto de las complejas interacciones entre factores.

Respecto al cociente t/ATD , el patrón observado en la figura 3.5.b sugiere que cuanto mayor fue el aporte de agua durante el invierno hubo una mayor proporción del agua disponible que quedó en el perfil edáfico (hasta un 50%), posiblemente debido a la baja actividad del cultivo y los menores requerimientos hídricos. Entonces, parte del agua que no fue transpirada podría migrar a las napas de agua y/o a los ríos, ya sea por percolación profunda y/o por escorrentía superficial o subsuperficial. Durante su paso por el agroecosistema el agua podría contaminarse con diversos elementos (de origen biológico, edáfico o industrial -agroquímicos-), ocasionar potenciales impactos sobre los demás ecosistemas de la región e, incluso, sobre el propio agroecosistema (ver capítulo 5).

3.5. CONCLUSIONES

La transpiración del cultivo de caña de azúcar responde de manera diferencial a las principales estrategias de manejo, siendo afectada en mayor medida por la longitud del ciclo de cultivo y por el mes en que es iniciado el cultivo. En base a estos resultados y ante un hipotético escenario que imponga restricciones sobre el consumo de agua masivo, impulsado por ejemplo por políticas estatales, el productor podría conducir el cañaveral con aquellas estrategias que reduzcan la transpiración del cultivo.

Las estimaciones de transpiración, para el conjunto de parcelas y el período analizados, presentaron un valor medio de $1204 \text{ mm ciclo}^{-1}$, con mínimos y máximos absolutos de 870 y $1970 \text{ mm ciclo}^{-1}$, respectivamente. Si se comparan estas cifras con los 800 mm año^{-1} de precipitación promedio (asumiendo una longitud de ciclo promedio de aproximadamente un año y que el agua de lluvia se almacena completamente en la rizósfera), surge que cuando el consumo es mínimo la transpiración del cultivo prácticamente es balanceada con la precipitación, mientras que cuando los requerimientos son máximos la necesidad de riego puede ser de hasta $1170 \text{ mm ciclo}^{-1}$. Sin embargo, al considerar la capacidad de aprovechamiento del agua disponible (t/ATD) (las medianas estuvieron entre 65 y 75%, dependiendo del nivel de riego invernal), surge que en todos los casos el cultivo debe ser irrigado y que los requerimientos de riego promedio fluctúan entre 360 y $2200 \text{ mm ciclo}^{-1}$ aprox. (que representan de $3,6$ a $22 \text{ MLt ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$). Desde el punto de vista del ciclo hidrológico, los niveles de transpiración estimados implican que el cultivo de caña de azúcar transfiere a la atmósfera entre $8,7$ y $19,7 \text{ MLt}$ por hectárea cultivada y por ciclo de producción, los cuales son exportados de la región por efecto del movimiento de las masas de aire de la atmósfera.

Capítulo 4

Factores que afectan

la eficiencia del uso del agua (EUA) y de la radiación (EUR)

en sistemas de producción de caña de azúcar

4.1. INTRODUCCION

El rendimiento del cultivo de caña de azúcar, entendido como el retorno (de caña o de azúcar) obtenido por hectárea, es la manera más habitual de expresar el desempeño del cultivo ante un conjunto de prácticas de manejo y en un ambiente determinado. Esto se debe a su simplicidad de cálculo, ya que depende de una única variable -la biomasa producida por el cultivo, que además es registrada sistemáticamente por la industria-, y a que está directamente relacionado con el resultado económico. Sin embargo, la eficiencia de producción (que resulta del cociente entre el producto obtenido y uno o más de los insumo requeridos para su obtención) constituye un indicador que podría ser de gran utilidad para describir el funcionamiento del cultivo y guiar su manejo. Por ejemplo, a partir de su empleo se podría elegir aquella estrategia de manejo que maximice el retorno físico obtenido, o bien la que minimice la cantidad de insumos requeridos para alcanzar determinado nivel de producción.

Ante la creciente escasez de recursos hídricos y energéticos que se está afrontando a nivel mundial (Postel, 2000; Pimentel et al., 2007), el desempeño del cultivo debería evaluarse además en términos de éstos recursos, concretamente en base a la eficiencia en el uso del agua (*EUA*) y de la radiación (*EUR*). Esto permitiría conciliar dos objetivos simultáneamente, el de producción y el de conservación de los recursos naturales, traducándose en una mayor sustentabilidad para el sector cañero. Además, beneficiaría directamente a la emergente industria de biocombustibles (obtención de etanol a partir del cultivo de caña de azúcar), ya que permitiría expresar el rendimiento relativizándolo a la principal entrada de energía al sistema, la radiación solar.

El cultivo de caña de azúcar se destaca por los comparativamente altos valores de *EUA* y *EUR* (Robertson et al., 1996; Muchow et al., 1997; Bastiaanssen et al., 2003). Por lo tanto, está considerado como uno de los cultivos con mayor productividad potencial de biomasa. Sin embargo, para que se pueda expresar dicha potencialidad se deben alcanzar niveles de eficiencia elevados y mantenerlos a lo largo de todo el ciclo de producción (van Heerden et al, 2010). Esto requiere en última instancia entender los controles ambientales y culturales que operan sobre ambas *EUA* y *EUR*, lo que permitiría guiar el manejo del cultivo maximizando la eficiencia.

En la bibliografía se pueden encontrar varios antecedentes sobre el comportamiento de estas eficiencias ante distintas estrategias de manejo del cultivo. Respecto a la edad del cañaveral, ambas *EUA* y *EUR* fueron mayores en el estadio caña planta que en los estadios socas (Robertson et al., 1996; Park et al., 2005; Singh et al., 2007). En relación con la longitud del ciclo de cultivo, Silva et al. (2008) encontraron que la *EUA* aumentó paulatinamente hasta los 7 a 9 meses de edad, seguido de una caída abrupta que resultó en los valores mínimos a los 12-13 meses. De modo similar, Muchow et al. (1997) encontraron que la *EUR* también decayó hacia el final del ciclo de cultivo, entre los 12 y 24 meses de edad. En relación con la irrigación del cultivo, Inman-Bamber et al. (1998) indicaron que las restricciones de riego aplicadas en las etapas de menor susceptibilidad del cultivo pueden resultar en elevados niveles de *EUA*, logrando importantes reducciones en el consumo de agua. Por otro lado, distintos autores encontraron un efecto significativo de la variedad cultivada sobre la *EUA* (Ramesh y Mahadevaswamy, 1999; Sudhakar et al., 2010) y sobre la *EUR* (Donaldson et al., 2008; van Heerden et al., 2010). Además, Olivier y Singels (2003) estudiaron la *EUA* de tres variedades sometidas a distintos regímenes de irrigación y encontraron que

estos dos factores interactuaban. Desde el punto de vista de la fenología del cultivo, Donaldson et al. (2008) hallaron que la *EUR* era afectada por el mes de inicio del ciclo del cultivo, estando la magnitud de la respuesta condicionada por el genotipo.

Si bien se puede encontrar una nutrida lista de antecedentes bibliográficos relacionados con ambas *EUA* y *EUR*, se observa que en su mayoría estudian la respuesta de alguna de estas eficiencias ante cambios en un solo factor de manejo o ambiental, o a lo sumo dos. De este modo, considerando que se trata de un agroecosistema complejo, afectado simultáneamente por numerosas variables, tanto la aplicabilidad como capacidad predictiva de estos resultados es acotada. Además, son realmente escasos los antecedentes sobre el comportamiento de estas eficiencias obtenidos en los cañaverales del NOA.

Por todo lo expuesto, el objetivo de este capítulo fue estudiar los controles que operan simultáneamente sobre cada una de las eficiencias, ponderando la importancia relativa de los distintos factores incluidos en el análisis. Este objetivo fue abordado utilizando una técnica de minería de datos o *data mining* llamada árboles de clasificación y regresión (CART, por sus siglas en inglés). Se trata de una técnica no paramétrica ideada y utilizada para encontrar relaciones implícitas en grandes bases de datos que incluyen numerosas variables (Dzeroski y Drumm, 2003; Etter et al., 2006; Ferraro et al., 2009). A partir de los resultados obtenidos se caracterizó el efecto de una serie de factores sobre la *EUA* y también sobre la *EUR*, y se determinó la importancia relativa de dichos factores. Luego, para cada una de las eficiencias se estudió el efecto individual de aquellos factores categorizados como más influyentes.

4.2. MATERIALES Y METODOS

4.2.1. Estimación de la eficiencia en el uso del agua *EUA*

La *EUA* relaciona la producción de biomasa con el agua insumida durante dicho proceso, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$EUA = \frac{R_c}{t} \quad (4.1)$$

donde R_c representa el rendimiento de caña ($t \text{ ha}^{-1}$), calculado como el peso fresco total de los macollos, y t la lámina de agua transpirada a lo largo del ciclo de producción (mm ciclo^{-1}). El dato de R_c corresponde a las mediciones realizadas en industria, luego de la limpieza del material cosechado (separación de restos foliares y otras impurezas), y fue proporcionado por el ingenio azucarero. Las estimaciones de t se obtuvieron de acuerdo con la metodología descrita en los capítulos 2 y 3.

4.2.2. Estimación de la eficiencia en el uso de la radiación *EUR*

El cálculo de la *EUR* surge del cociente entre la biomasa producida por el cultivo y la radiación insumida para ello, tal como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$EUR = \frac{R_b}{RFA_a} \quad (4.2)$$

donde R_b representa la biomasa aérea (g m^{-2} , expresada en base seca) acumulada al final del ciclo y RFA_a es la radiación fotosintéticamente activa absorbida a lo largo del ciclo de cultivo (Mj m^{-2}). El valor de R_b se estimó multiplicando al valor del rendimiento de caña (R_c) por el coeficiente 0,7. Este coeficiente fue propuesto originalmente por Robertson et al. (1996) y posteriormente incorporado a la rutina de cálculo del modelo de simulación *APSIM-sugarcane* (Keating et al., 1999). La estimación del parámetro RFA_a se realizó en base a la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) y la fracción de ésta que es absorbida por la vegetación ($fRFA_a$):

$$RFA_a = RFA * fRFA_a \quad (4.3)$$

El dato de RFA [$\text{Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$] se obtuvo a partir de los registros diarios de radiación solar incidente, asumiendo que la primera representa el 48% de la radiación solar (McCree, 1972). Las mediciones de radiación solar incidente provienen de una estación meteorológica situada en el centro del área de estudio (ver capítulo 3). Como se disponía de este único registro se utilizó el mismo valor de RFA para todos los píxeles analizados.

Para estimar la $fRFA_a$ se consideró que ésta y el índice verde normalizado (IVN) se relacionan a través de una función no lineal (Gallo et al., 1985; Potter et al., 1993; Grigera et al., 2007). Esta función no lineal representa la saturación del IVN a altos niveles de área foliar ($IAF > 3$) (Baret y Guyot, 1991; Sellers et al., 1992; Asner et al., 2004), y fue expresada directamente a través de la relación lineal existente entre la $fRFA_a$ y SR , de acuerdo con:

$$fRFA_a = \min\left[SR / (SR_{\max} - SR_{\min}), SR_{\min} / (SR_{\max} - SR_{\min}), 0.95\right] \quad (4.4)$$

SR (del inglés, *simple ratio*) es un índice que se calcula como el cociente $(1 + IVN) / (1 - IVN)$. Para estimar el valor máximo de SR (SR_{\max}) se utilizó el percentil 95 de IVN , mientras que la estimación del valor mínimo (SR_{\min}) se basó en el IVN de aquellas situaciones en que no existen tejidos fotosintéticos (suelo desnudo o cubierto de material senescente). La función $\min[\cdot, 0.95]$ impone un límite superior del 95% a la absorción de RFA .

4.2.3. Análisis de los datos

Análisis de regresión por cuantiles. Esta técnica permite hacer un análisis de regresión entre una variable respuesta y una variable predictora, pero donde la regresión se realiza para una fracción (percentil en este caso) de la población de datos que componen a la variable respuesta (Cade y Noon, 2003). En este capítulo el análisis de regresión por cuantiles se realizó con dos objetivos distintos. Por un lado, al caracterizar la respuesta de la biomasa de un cultivo ante cambios en la disponibilidad de un recurso (EUA o EUR , según corresponda), la pendiente de esta relación estimada para los percentiles 95, 50 y 5 permitió estimar las eficiencias máxima (o potencial), media y mínima, respectivamente. Por otro lado, cuando se representó la respuesta de cada una de las eficiencias ante cambios en alguna/s de las variables predictoras presentadas en la tabla 4.1, se caracterizaron los percentiles comprendidos entre 5 y 95, tomados a intervalos de

5 puntos. Este análisis permitió describir el efecto que tiene la variable predictora a lo largo de todo el rango de variación de las eficiencias, expresado a través de los cambios (signo y valor) de ambas pendiente y ordenada al origen. Para hacer los análisis se ha empleado el modelo de regresión lineal:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (4.5)$$

donde y es la variable dependiente, x es la variable independiente o predictora, β_0 es la ordenada al origen y β_1 es la pendiente. Para probar si la pendiente fue estadísticamente distinta de cero se utilizó el *Rank score test* (10000 permutaciones, $\alpha = 0,05$), con $H_0: \beta_1=0$. Para probar si la ordenada al origen fue estadísticamente distinta de cero se utilizó el mismo procedimiento, pero con $H_0: \beta_0=0$. El análisis se efectuó con el software *Blossom* versión W2007 (Fort Collins Science Center, 2007).

Árboles de clasificación y regresión. Se trata de una metodología de minería de datos (o *data mining*) no paramétrica conocida como CART (del inglés, *classification and regression trees*) y constituye una variante de las técnicas de análisis multivariado (Breiman et al., 1984). Los detalles de la técnica fueron descritos en el capítulo 3. En este capítulo, se realizaron dos árboles de clasificación, uno para la *EUA* y otro para la *EUR*. Se incluyeron ocho variables predictoras en cada caso: longitud del ciclo de cultivo, año de zafra, variedad de caña cultivada, época de plantación, mes de inicio del ciclo de cultivo, mes de cosecha, edad del cañaveral y lámina de riego invernal (Tabla 3.1).

Técnicas de análisis complementarias al CART. En base al análisis de CART se seleccionaron aquellas variables que recibieron mayor puntuación por su contribución relativa al armado de ambos árboles (*EUA* y *EUR*) y se estudió el efecto de cada variable, tomada de manera aislada, sobre las eficiencias. En el caso de que se tratara de variables continuas, los resultados se analizaron mediante regresión simple o por cuantiles (ver más arriba). De tratarse de variables discretas, se realizó un análisis de la varianza a una vía. Los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianza se evaluaron con las pruebas de Shapiro-Wilks y de Levene, respectivamente, transformando previamente los datos cuando fue necesario. Cuando, a pesar de las transformaciones, no se cumplió el supuesto de homogeneidad de varianza se aplicó la corrección de Welch. En cualquiera de estos casos, las comparaciones múltiples o *pruebas a posteriori* se realizaron con la prueba de Tukey (o Tukey-Cramer, cuando los tamaños de muestras fueron desiguales). Si los datos no seguían una distribución normal se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, en cuyo caso las comparaciones múltiples se hicieron mediante el método de Dunn. El nivel de significancia considerado fue del 5% en todos los casos. Ante el incumplimiento de ambos supuestos, se realizó un análisis descriptivo de los datos utilizando un gráfico de cajas (*box plot*), donde los bigotes representan los valores extremos superior e inferior.

Descripción de la base de datos. Respecto a la cantidad de datos analizados, para la regresión por cuantiles se utilizó un total de 214 registros, mientras que el árbol de clasificación y regresión se construyó a partir de 217 registros. En el caso de las técnicas complementarias a dicho árbol el número dependió de la variable en cuestión (ver Tabla 3.1).

4.3. RESULTADOS

4.3.1. Eficiencia en el uso del agua

La máxima eficiencia en el uso del agua estimada de la submuestra de lotes de los cañaverales de Ledesma fue de 0,115 toneladas de caña por cada milímetro de agua transpirada (i.e., 11,5 kg m⁻³) (recta que corresponde al percentil 95 de rendimiento, Figura 4.1). La diferencia entre los niveles extremos de *EUA* fue de 0,067 t mm⁻¹, de manera que la *EUA* máxima superó en un 140% a la mínima. Así, ante valores intermedios de transpiración (1250 mm) o de rendimiento (100 t), los cañaverales podrían diferir en hasta 84 t de rendimiento o bien en hasta 1500 mm ciclo⁻¹ de transpiración, respectivamente.

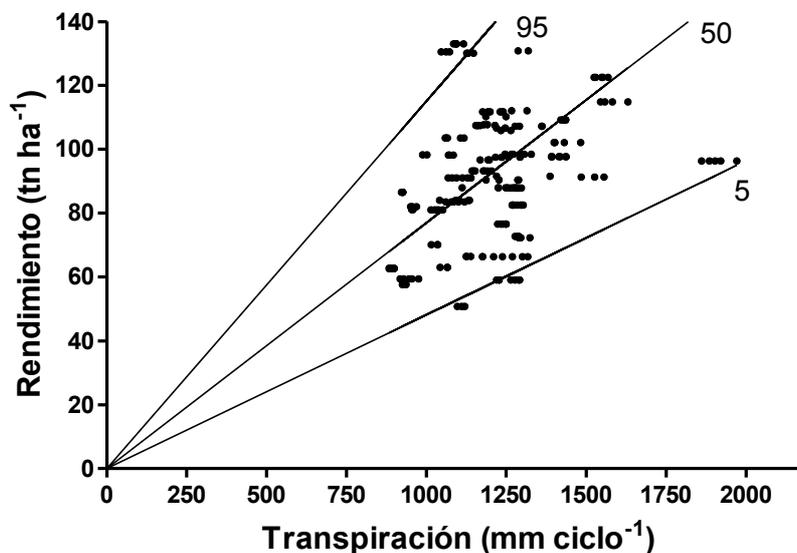


Figura 4.1. Análisis de la respuesta del rendimiento de caña (t ha⁻¹) ante cambios en la cantidad de agua transpirada por el cultivo (mm ciclo⁻¹) (n=214). Las ecuaciones que describen a las rectas de los tres percentiles son: $P_{5} y = 0,048 \bullet X$; $P_{50} y = 0,077 \bullet X$; $P_{95} y = 0,115 \bullet X$.

El árbol de clasificación obtenido presentó 8 nodos terminales, cada uno de los cuales constituye un grupo de parcelas que difieren en su respuesta (*EUA*) a las distintas variables estudiadas (Figura 4.2). En primer lugar, la clasificación de los datos se realizó en base a la edad del cañaveral: el árbol se ramificó agrupando a la derecha a los cañaverales que se encontraban en los estadios caña planta y soca 4 o mayores, caracterizados por una menor *EUA*, mientras que por la izquierda se agruparon aquellos que estaban en los estadios soca 1, 2 ó 3, caracterizados por una mayor *EUA*. Luego, el último grupo fue clasificado en función del mes de inicio del ciclo en dos nuevas ramas, agrupando por la izquierda a las parcelas iniciadas en septiembre (con mayor *EUA*) y a la derecha al resto de las parcelas. Aquellas cuyo ciclo se inició en septiembre (rama izquierda) fueron clasificadas nuevamente, esta vez en función del genotipo, dando origen a dos nodos terminales: el de la izquierda fue el de menor *EUA* (9,08 t ML⁻¹) y estuvo representado por las variedades 8 y 9, mientras que el de la derecha, que reunió al resto de las variedades, tuvo una *EUA* de 11,88 t ML⁻¹. Continuando con la rama derecha (nodo 5, parcelas cuyo ciclo no se inició en septiembre), se realizó una nueva clasificación en función del genotipo: aquellas parcelas en que se cultivó la variedad 2 conformaron un nodo terminal con una *EUA* promedio de 10,35. Las parcelas en que se cultivó el resto de las variedades (de menor *EUA*) volvieron a clasificarse en función de la cantidad de eventos de riego invernal que

recibieron, agrupándose por la izquierda a las parcelas con mayor irrigación (2 y 3 eventos), caracterizados por una menor *EUA*, y por la derecha a las restantes (0 y 1 eventos). De estos grupos, el primero se clasificó en base a la presencia de la variedad 7 y originó dos nodos terminales, alcanzando una mayor *EUA* las parcelas que cumplían

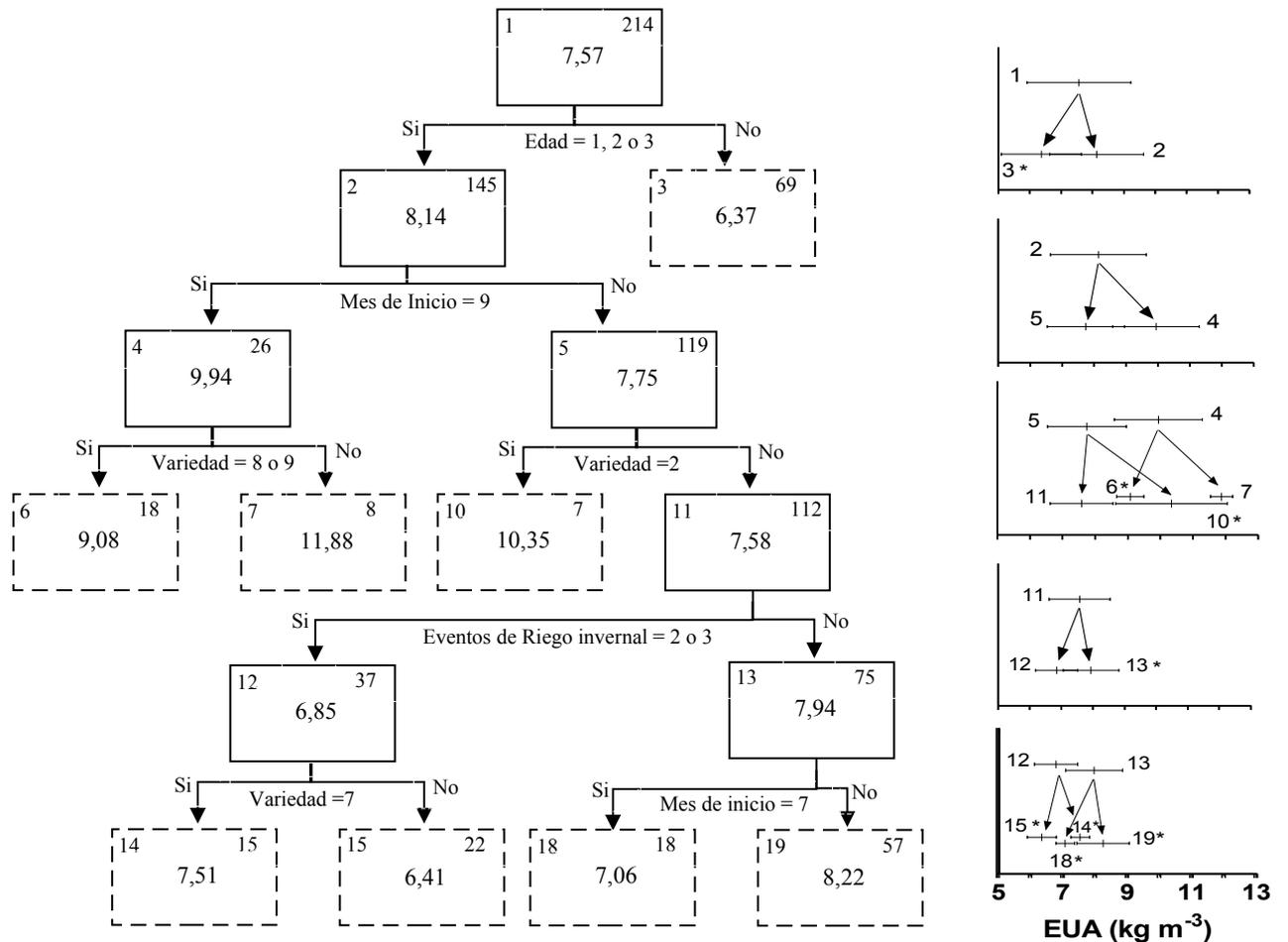


Figura 4.2. Arbol de clasificación obtenido para los datos de *EUA* del cañaveral (n=214). En cada nodo (intermedios recuadrados con línea continua, terminales recuadrados con línea discontinua) se indica el número identificador (vértice superior izquierdo), la cantidad de parcelas que lo representan (vértice superior derecho) y la *EUA* media (kg m^{-3} , centro del nodo). Para cada nodo intermedio se presenta el criterio de clasificación (variable presentada debajo del recuadro del nodo respectivo), y los niveles de dicha variable que caracterizan a los nodos hijos. Los gráficos de la derecha representan para cada nivel de clasificación la *EUA* (promedio \pm 1 desvío estandar) de los nodos madre y de los nodos hijos resultantes (un asterisco identifica a los nodos terminales).

esta condición. El otro grupo (0 y 1 eventos de riego invernal) también originó dos nodos terminales y fue clasificado según las parcelas hayan o no iniciado el ciclo de cultivo en julio, presentando una menor *EUA* las parcelas que cumplieron esta condición. Del total de ocho grupos (nodos terminales) resultantes, aquel con la menor *EUA* promedio fue el nodo 3, que estaba conformado por parcelas muy jóvenes

(edad 0 -estadio caña planta-) o muy viejas (soca 4 en adelante). El grupo que presentó la mayor *EUA* fue el nodo 7, y reunió a las parcelas que estaban en el estadio soca 1, 2 ó 3, que iniciaron su ciclo de crecimiento en el mes de septiembre y que fueron cultivadas con variedades distintas a la 8 y 9. La varianza promedio del árbol de clasificación fue igual a 1.385.

La variedad fue la variable con mayor influencia sobre la construcción del árbol de clasificación, superando en aproximadamente un 25% a la segunda variable más importante (Figura 4.3). Le siguió en importancia (con valores de entre 50 y 70%) un grupo de cuatro variables, constituido por el mes de inicio del ciclo de cultivo, la cantidad de eventos de riego invernal, la longitud de ciclo y la edad del cañaveral (enumerados de acuerdo a un orden de importancia decreciente). El último grupo, con una importancia del 33% o menor, estuvo constituido por las variables mes de cosecha, año de zafra y época de plantación. A partir de estos resultados, se seleccionaron aquellas variables con mayor importancia relativa y se analizó el efecto individual de cada una de ellas sobre la *EUA*.

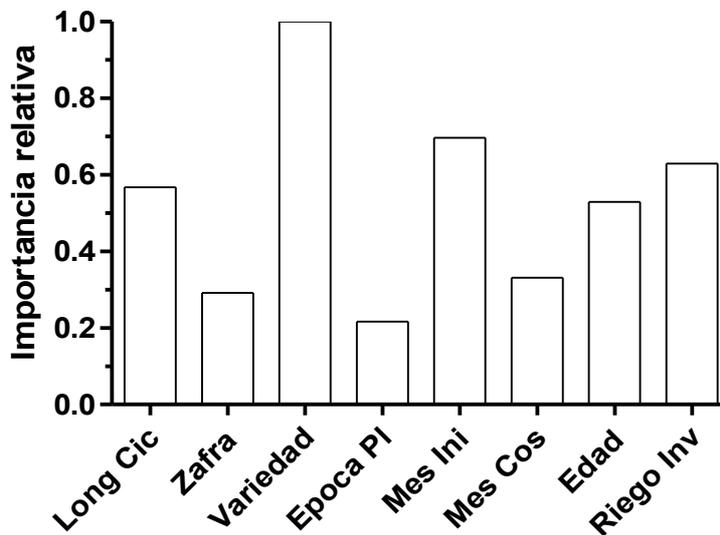


Figura 4.3. Ranking de la importancia que ejercen las ocho variables que intervienen en la construcción del árbol de clasificación.

Pese a que no se analizó estadísticamente el efecto del genotipo, la *EUA* mostró una tendencia a modificarse en respuesta a las distintas variedades estudiadas (Figura 4.4.a). Las variedades 1 y 7 se diferenciaron del resto por presentar un comportamiento mucho más estable. Los mayores niveles de *EUA* fueron alcanzados por los cuartiles superiores de las variedades 2 y 8. Por el contrario, los cuartiles inferiores de las variedades 9 y 10 presentaron los menores valores de *EUA*.

El mes en que se inició el ciclo de cultivo influyó sobre la *EUA* de la caña de azúcar (resultado no demostrado estadísticamente) (Figura 4.4.b). Los valores más altos de *EUA* fueron observados para los cuartiles superiores de los meses 9 y 10. En cambio, los valores más bajos se observaron para los cuartiles inferiores de los meses de inicio 2 y 7. Los meses 6 y 11 se caracterizaron por tener una *EUA* media y un comportamiento más estable que el resto de los meses.

El mes en que se inició el ciclo de cultivo influyó sobre la *EUA* de la caña de azúcar (resultado no demostrado estadísticamente) (Figura 4.4.b). Los valores más altos

de *EUA* fueron observados para los cuartiles superiores de los meses 9 y 10. En cambio, los valores más bajos se observaron para los cuartiles inferiores de los meses de inicio 2 y 7. Los meses 6 y 11 se caracterizaron por tener una *EUA* media y un comportamiento más estable que el resto de los meses.

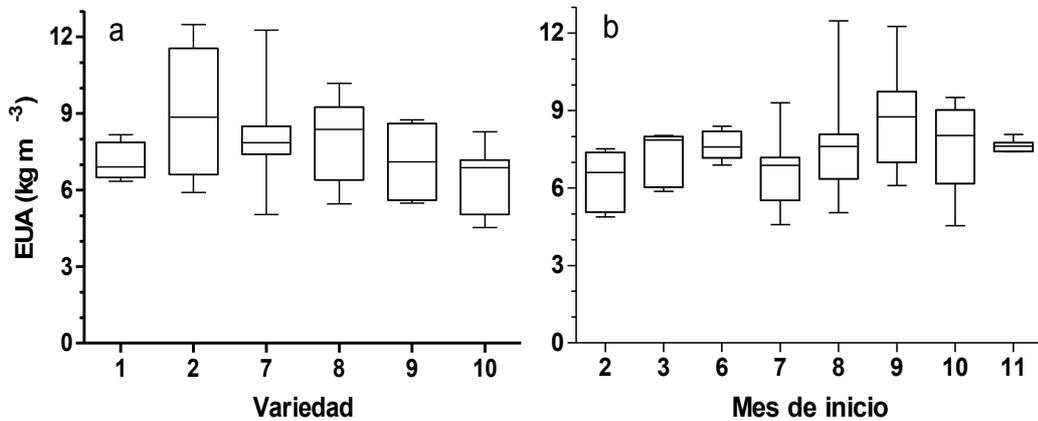


Figura 4.4. Eficiencia en el uso del agua (Kg m^{-3}) en función de la variedad cultivada (a) y del mes de inicio del ciclo de cultivo (b). Para cada nivel de las variables independientes se presentan la mediana, junto con los cuartiles inferior y superior (cajas) y los valores extremos (bigotes). Las variedades son: 1 *CP 68 350*; 2 *CP 70 1133*; 7 *NA 84 3920*; 8 *NA 85 1602*; 9 *TUC 72 16*; 10 *TUC 77 42*.

La magnitud de la lámina de riego invernal acumulada alteró la *EUA* del cultivo, con respuestas positivas, neutras y negativas de la eficiencia ante incrementos de la irrigación (Figura 4.5.a). En particular, la pendiente de la relación fue significativamente positiva para el percentil 5 de *EUA* (esto es, para el 5% inferior de

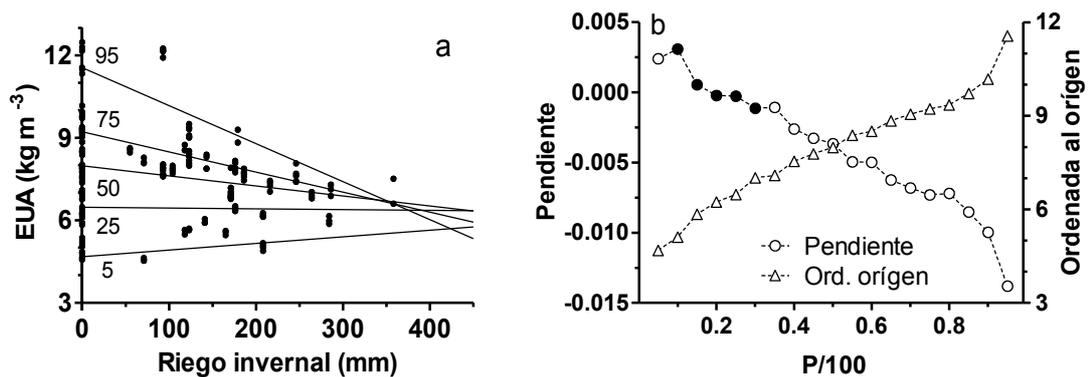


Figura 4.5. a) Eficiencia en el uso del agua del cañaveral (Kg m^{-3}) en función de la lámina de riego (mm) aportada durante la estación invernal ($n=214$). Las ecuaciones de las rectas son: $P_5 Y = 2,39 \times 10^{-3} \bullet X + 4,68$; $P_{25} Y = -2,67 \times 10^{-4} \bullet X + 6,48$; $P_{50} Y = -3,66 \times 10^{-3} \bullet X + 7,99$; $P_{75} Y = -7,31 \times 10^{-3} \bullet X + 9,22$; $P_{95} Y = -1,38 \times 10^{-2} \bullet X + 11,55$. b). Respuesta de la pendiente (cociente *EUA*:Riego invernal) y de la ordenada al origen ante cambios en el percentil de la *EUA* ($P/100$). Símbolos vacíos indican valores estadísticamente distintos de cero.

la población de valores de eficiencia estudiados), neutra para el rango 10-30 de percentiles y negativa para los percentiles mayores a 30 ($\alpha = 0,05$) (Figura 4.5.b). En cambio, la ordenada al origen de la figura 4.5.a (*EUA* estimada para cada percentil en ausencia de riego invernal) fue siempre estadísticamente mayor a cero ($p < 0,05$), incrementándose gradualmente desde 4,7 a 11,5 kg m^{-3} conforme aumentó el percentil desde 5 a 95%.

Los cambios de la longitud del ciclo de cultivo afectaron la *EUA* del cañaveral. Así, la pendiente que describe la respuesta de la *EUA* ante cambios en esta variable fue negativa en todos los casos ($p < 0,05$) salvo para el percentil 5 de *EUA*, donde fue positiva pero estadísticamente igual a cero ($p = 0,42$) (Figuras 4.6 a y b). Sin embargo, los valores se mantuvieron relativamente estables en un rango de valores intermedios. En cambio, la ordenada al origen fue siempre positiva ($p < 0,05$) y aumentó gradualmente conforme se incrementó el percentil de *EUA* considerado.

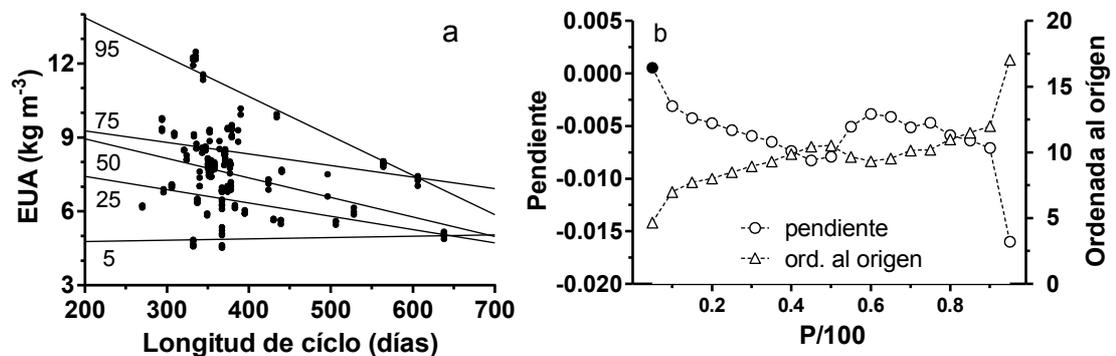


Figura 4.6. a) Análisis de regresión por cuantiles para la relación entre la *EUA* y la longitud del ciclo de cultivo ($n = 214$). Las ecuaciones de las rectas son $P_{\underline{5}} Y = 5,5 \times 10^{-4} \bullet X + 4,664$; $P_{\underline{25}} Y = -5,39 \times 10^{-3} \bullet X + 8,5$; $P_{\underline{50}} Y = -7,91 \times 10^{-3} \bullet X + 10,528$; $P_{\underline{75}} Y = -4,67 \times 10^{-3} \bullet X + 10,197$; $P_{\underline{95}} Y = -1,6 \times 10^{-2} \bullet X + 17,047$. b) Respuesta de la pendiente y de la ordenada al origen correspondientes a la relación del gráfico “a” ante cambios en el percentil (P/100) de la *EUA*. Símbolos vacíos indican valores estadísticamente distintos de cero.

La edad del cañaveral afectó significativamente la *EUA* del cultivo ($\alpha = 0,05$) (figura 4.7). Los mayores niveles de *EUA* se observaron para los estadios soca 1, 2 y 3. En cambio, los menores valores de *EUA* le correspondieron a los estadios caña planta (el más joven) y soca 4, 5 y 7 (los más viejos entre los estudiados). La variabilidad de la *EUA* fue menor cuando el cultivo se encontró en los estadios más viejos (soca 4, 5 y 7). En el estadio soca 5 se advierte un fuerte asimetría positiva de los datos, que conducen a un* a superposición entre el cuartil superior de S5 con el cuartil inferior de CP.

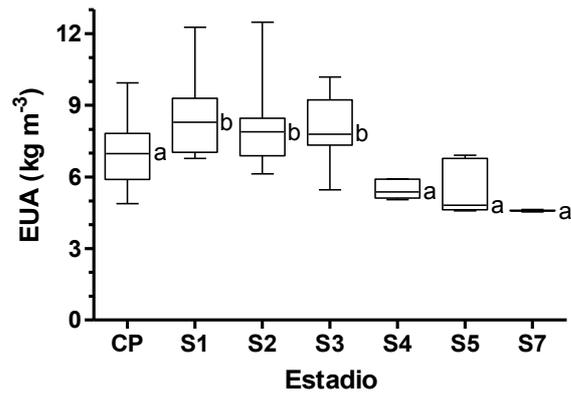


Figura 4.7. Eficiencia en el uso del agua en función de la edad del cañaveral. Para cada estadio, las cajas muestran la mediana, el cuartil inferior y el superior, mientras que los bigotes indican el valor mínimo y máximo. Letras distintas indican diferencias significativas entre medianas ($p < 0,05$, Kruskal Wallis, Dunn's post test). CP indica caña planta y S1, ..., S7 indican socas 1 a 7.

4.3.2. Eficiencia en el uso de la radiación

La máxima eficiencia en el uso de la radiación estimada fue de 4,18 g de biomasa aérea por cada M_j de radiación fotosintéticamente activa absorbida (correspondiente al percentil 95 de biomasa aérea, Figura 4.8). La diferencia entre los valores extremos de EUR (percentiles 5 y 95) fue de 2,14 $g\ M_j^{-1}$, lo que significa que la EUR máxima fue un 105% mayor que la mínima.

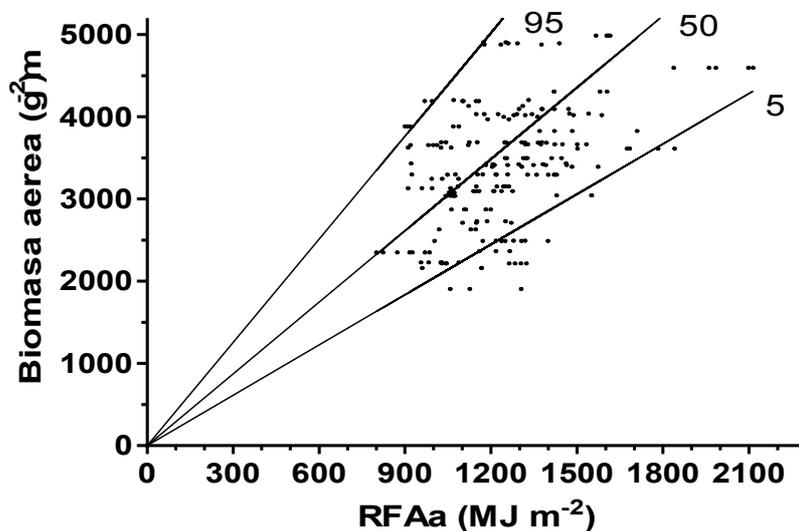


Figura 4.8. Análisis de la respuesta de la biomasa aérea total ($g\ m^{-2}$), expresada en base seca, ante cambios en la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo ($M_j\ m^{-2}$) ($n=214$). Las ecuaciones que describen a las rectas de los tres percentiles son: $P_5\ y = 2,04 \bullet X$; $P_{50}\ y = 2,90 \bullet X$; $P_{95}\ y = 4,18 \bullet X$.

El árbol de clasificación obtenido presentó 7 nodos terminales (Figura 4.9). Inicialmente, las parcelas se clasificaron según estuvieran en los estadios caña planta o

soca 4 y mayores (grupo de menor *EUR* y que conformó un nodo terminal), o bien en los estadios soca 1, 2 o 3. Luego, el último grupo fue clasificado en función del año de zafra, agrupándose a la derecha a las parcelas cosechadas en 2002 o 2003 (nodo terminal, de menor *EUR*) y, a la izquierda, a aquellas cosechadas en 2004 o 2005. Continuando con la rama izquierda, la nueva clasificación se realizó en función de la frecuencia de riego invernal: cuando ésta fue de 2 o 3 eventos por ciclo la *EUR* media fue menor y, luego de una nueva clasificación, esta vez en base al mes de cosecha, condujo a dos nodos terminales. Por el contrario, cuando la asignación fue menor a 2 o 3 eventos de riego invernal, las parcelas se agruparon en función del genotipo: la utilización de variedades distintas a 7, 9 o 10 condujo a la mayor *EUR* y conformó un nodo terminal (rama derecha). La rama izquierda estuvo conformada por las restantes parcelas (aquellas donde estaban presentes las variedades 7, 9 o 10) y fue clasificada en base al mes de inicio del ciclo de cultivo en dos nodos terminales: aquel de mayor *EUR* fue el que agrupó a las parcelas que iniciaron el ciclo en octubre.

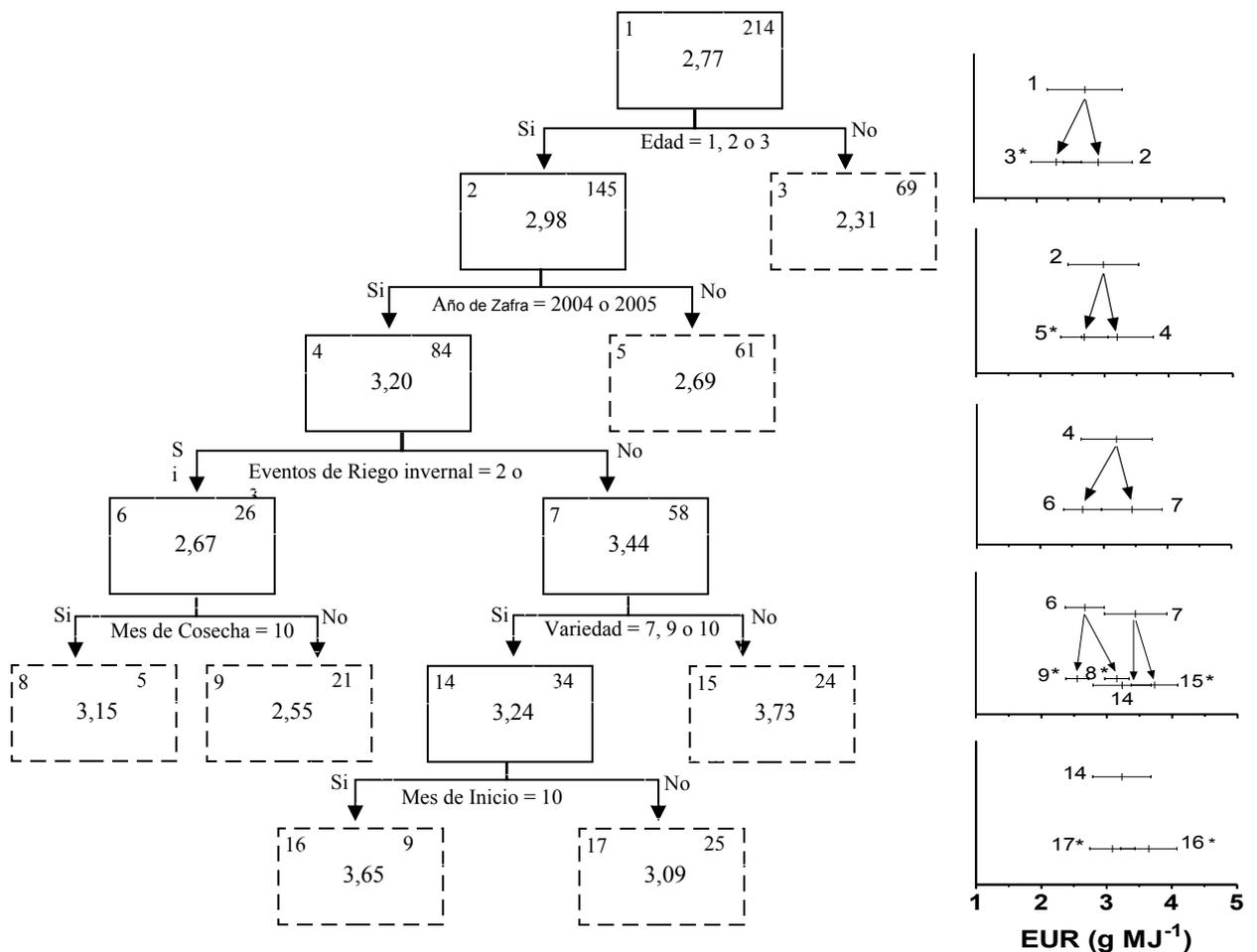


Figura 4.9. Arbol de clasificación obtenido para los datos de la *EUR* del cañaveral ($n=214$). En cada nodo (intermedios recuadrados con línea continua, terminales recuadrados con línea discontinua) se indica el número identificatorio (vértice superior izquierdo), la cantidad de parcelas que lo representan (vértice superior derecho) y la *EUR* media (g MJ^{-1} , centro del nodo). Para cada nodo intermedio se presenta el criterio de clasificación (variable presentada debajo del recuadro del nodo respectivo), y los niveles de dicha variable que caracterizan a los nodos hijos. Los gráficos de la derecha representan para cada nivel de clasificación la *EUR* (promedio ± 1 desvío estandar) de los nodos madre y de los nodos hijos resultantes (los números identifican a cada nodo, un asterisco identifica a los nodos terminales).

De los siete grupos (nodos terminales) resultantes, el nodo 3 fue el de la menor *EUR* promedio, y agrupó parcelas muy jóvenes (edad 0 -estadio caña planta-) o muy viejas (soca 4 en adelante). Por el contrario, la mayor *EUR* le correspondió al nodo 15, y reunió a las parcelas que estaban en el estadio soca 1, 2 ó 3 y cosechadas en las zafra 2004 o 2005, que recibieron poca o nula irrigación invernal (entre uno y ningún evento) y en las que se plantaron variedades que no fueron la 7, 9 ni 10. La varianza promedio del árbol fue igual a 0,19.

Las variables involucradas en el armado del árbol de clasificación difirieron en la importancia que tuvieron sobre dicho proceso de construcción (Figura 4.10). La variedad de cultivo y la edad del cañaveral, seguidas por el año de zafra, fueron las variables más importantes. Luego, con una importancia relativa de entre el 55 y el 70 % se hallaron la longitud del ciclo de cultivo, los meses de inicio del ciclo y de la cosecha y la cantidad de eventos de riego invernal. Por último, la menor importancia (13,9%) le correspondió a la época de plantación. A continuación se analiza el efecto individual de aquellas variables caracterizadas por una importancia media y alta.

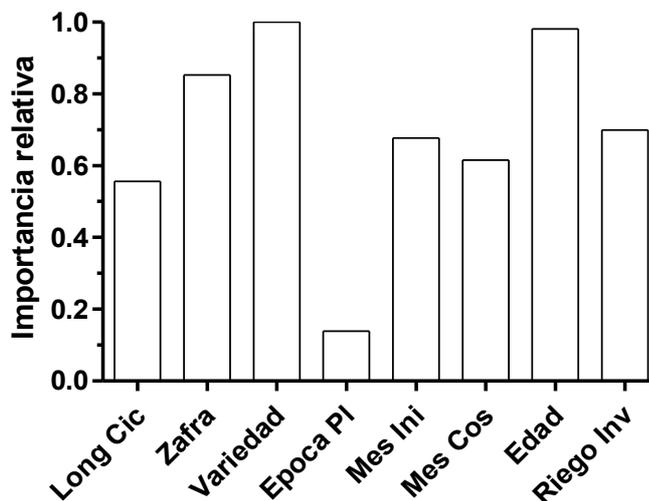


Figura 4.10. Ranking de la importancia que ejercen las variables que intervienen en la construcción del árbol de clasificación.

La identidad del genotipo cultivado afectó la *EUR* del cañaveral (Figura 4.11.a). Así, la *EUR* de las variedades 2 y 8 superó a la de las variedades 1, 9 y 10, mientras que la variedad 7 presentó una *EUR* intermedia que no difirió de los demás genotipos ($\alpha = 0,05$).

La *EUR* estimada se modificó en función la edad del cañaveral (Figura 4.11.b). Si bien no se analizaron las diferencias estadísticamente, los mayores niveles de *EUR* fueron alcanzados por los estadios de edad intermedia, concretamente soca 1, 2 y 3 (los rangos intercuartílicos se encontraron entre 2,56 y 3,65 g Mj^{-1}). Por el contrario, el estadio más joven (recién plantado), correspondiente a caña planta, presentó un rango intercuartílico de 2,18-2,69 g Mj^{-1} . La menor *EUR* se observó para los estadio más viejos (soca 4 en adelante), con valores que estuvieron en torno de los 2 g Mj^{-1} , cercanos a la *EUR* mínima (percentil 5) identificada en la Figura 4.8. Además, los estadios soca 4, 5 y 7 fueron los de menor variabilidad.

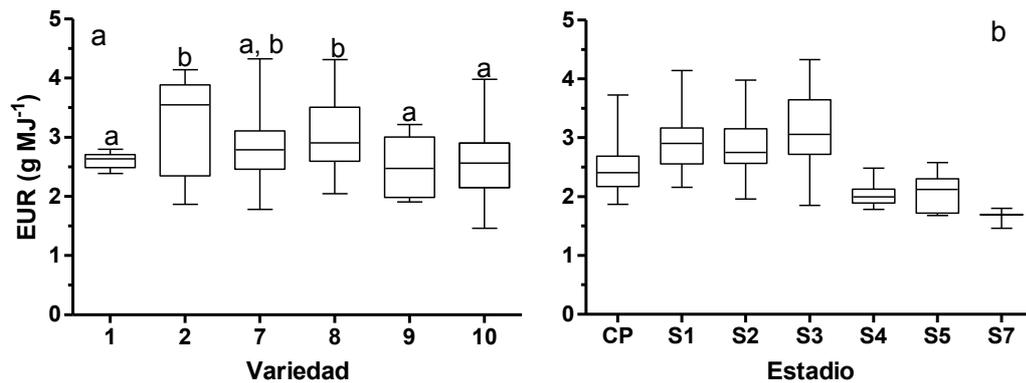


Figura 4.11. a) Eficiencia en el uso de la radiación (Mj g^{-1}) en función de la variedad cultivada (las variedades son: 1 *CP 68 350*; 2 *CP 70 1133*; 7 *NA 84 3920*; 8 *NA 85 1602*; 9 *TUC 72 16*; 10 *TUC 77 42*). Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, Welch ANOVA). b) *EUR* en función de la edad del cañaveral (CP indica caña planta y S1, ..., S7 indican socas 1 a 7). Las cajas muestran la mediana, el cuartil inferior y el superior de cada estadio, mientras que los bigotes indican los valores mínimo y máximo.

La *EUR* difirió significativamente a lo largo del período de tiempo analizado en este estudio ($\alpha = 0,05$) (Figura 4.12). De este modo, las zafas 2004 y 2005 presentaron niveles de *EUR* promedio mayores que la zafa 2003, mientras que ésta superó a la *EUR* de la zafa 2002.

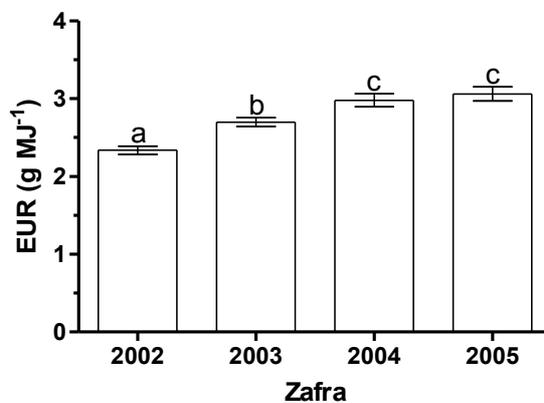


Figura 4.12. Eficiencia en el uso de la radiación (g MJ^{-1}) ($\pm 1 \text{ EE}$) estimada para las zafas 2002, 2003, 2004 y 2005. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, Welch ANOVA).

La lámina de riego asignada durante la estación invernal alteró la *EUA* del cultivo, con respuestas positivas, neutras y negativas de la eficiencia ante incrementos de la irrigación (Figura 4.13.a). Así, la pendiente de la relación fue significativamente positiva para los percentiles de *EUA* 25 e inferiores, neutra para el rango 30-50 de percentiles y negativa para el rango igual o mayor a 50 ($\alpha = 0,05$) (Figura 4.13.b). En el caso de la ordenada al origen de la figura 4.13.a, por el contrario, el valor se incrementó desde 1,73 a 4,16 g MJ^{-1} y fue siempre estadísticamente distinta de cero ($p < 0,05$) (Figura 4.13.b).

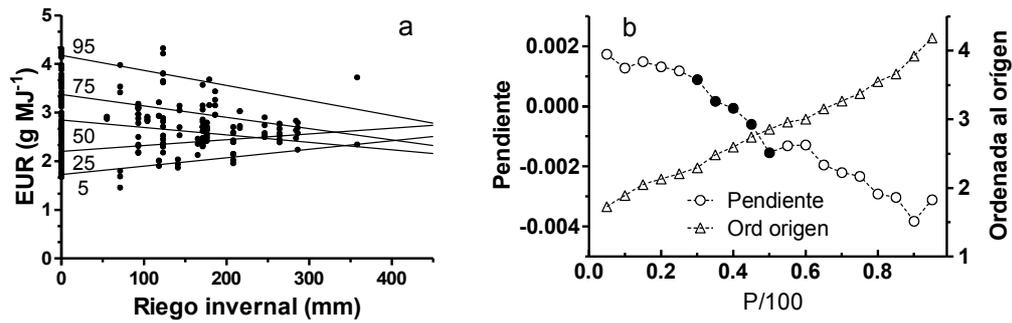


Figura 4.13. a) Eficiencia en el uso de la radiación del cañaveral (g MJ^{-1}) en función del riego invernial (lámina) aportado durante el ciclo de cultivo ($n=214$). Las ecuaciones de las rectas son $P_5 Y = 1,74 \times 10^{-3} \bullet X + 1,73$; $P_{25} Y = 1,18 \times 10^{-3} \bullet X + 2,20$; $P_{50} Y = -1,54 \times 10^{-3} \bullet X + 2,86$; $P_{75} Y = -2,33 \times 10^{-3} \bullet X + 3,37$; $P_{95} Y = -3,11 \times 10^{-3} \bullet X + 4,18$. b) Respuesta de la pendiente (cociente EUR :Riego invernial) y de la ordenada al origen ante cambios en el percentil de la EUR (expresado como $P/100$). Símbolos vacíos indican valores estadísticamente distintos de cero.

La EUR alteró su comportamiento ante cambios en la fecha en que se inició el ciclo de cultivo (Figura 4.14.a). Si bien los niveles de eficiencia presentaron una gran superposición entre los distintos meses estudiados, los mayores valores fueron alcanzados cuando el ciclo se inició en los meses 8, 9 y 11. En el extremo opuesto, las menores eficiencias se observaron para los cuartiles inferiores de los meses 2, 3, 7 y 10. Cuando el ciclo de cultivo se inició en los meses 3 o 6 la EUR fue más estable, y estos meses se diferenciaron entre sí por tener el primero un rango de eficiencias bajo y, el segundo, un rango de valores medios.

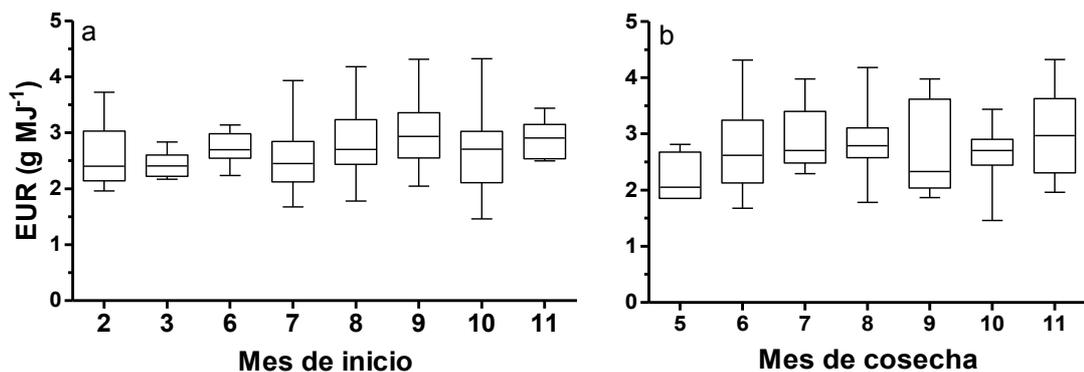


Figura 4.14. Eficiencia en el uso de la radiación (g MJ^{-1}) en función de los meses de inicio del ciclo de cultivo (a) y de cosecha (b). Para cada nivel de las variables independientes se presentan la mediana, junto con los cuartiles inferior y superior (cajas) y los valores extremos (bigotes).

La fecha en que finalizó el ciclo anual de cultivo (i.e., el mes de cosecha) también influyó sobre la EUR del cañaveral (figura 4.14.b). Por un lado, pueden destacarse los meses 9 y 11 por haber alcanzado los mayores niveles de eficiencia. Sin

embargo, el mes 9, debido a la gran variabilidad del rango intercuartílico y especialmente a la distribución asimétrica de los registros, presenta una gran frecuencia de registros con baja *EUR*. Los meses 5 y 6 también se destacan por tener bajas eficiencias. En cambio, cuando la cosecha ocurrió en los meses 8 o 10 se observó un rango intercuartílico mucho más acotado y caracterizado por niveles medios de *EUR*.

La longitud del ciclo de cultivo tuvo un efecto variable sobre la *EUR*. En términos absolutos, los mayores niveles de eficiencia se alcanzaron cuando el ciclo fue menor o igual a los 400 días (Figura 4.15.a). Sin embargo, al analizar en términos relativos los distintos rangos (percentiles) de *EUR* se observó que el quintil inferior (esto es, percentil 20 e inferiores) la *EUR* no fue afectada significativamente por la longitud de ciclo (pendiente = 0, $\alpha = 0,05$). En cambio, para los niveles de *EUR* medios y altos (percentiles iguales o mayores a 25%) el aumento de longitud de ciclo condujo a una pérdida de eficiencia, con reducciones de entre 0,094 y 0,37 g Mj^{-1} por cada 100 días de incremento en la longitud.

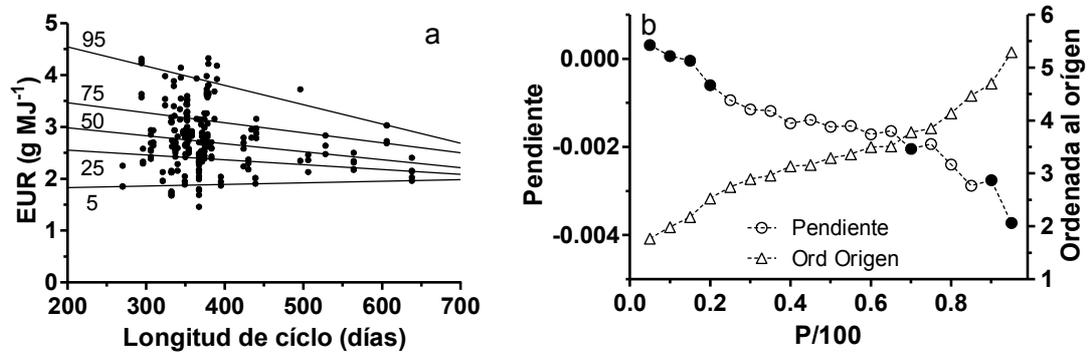


Figura 4.15. a) Eficiencia en el uso de la radiación del cañaveral (g Mj^{-1}) en función de la duración del ciclo de cultivo (días) ($n=214$). Las ecuaciones de las rectas son $P_{5} Y = 3,13 \times 10^{-4} \bullet X + 1,768$; $P_{25} Y = -9,37 \times 10^{-4} \bullet X + 2,743$; $P_{50} Y = -1,54 \times 10^{-3} \bullet X + 3,291$; $P_{75} Y = -1,93 \times 10^{-3} \bullet X + 3,854$; $P_{95} Y = -3,72 \times 10^{-3} \bullet X + 5,288$. b) Respuesta de la pendiente (cociente *EUR* : Longitud de Ciclo) y de la ordenada al origen ante cambios en el percentil de la *EUR* (expresado como $P/100$). Símbolos vacíos indican valores estadísticamente distintos de cero.

4.4. DISCUSION

El rango de valores de *EUA* estimados en este trabajo (4,82 - 11,51 t ML^{-1}) es coherente con los valores de entre 4,8 y 12,1 t ML^{-1} recopilados en cultivos de caña de Sud Africa, Hawaii y Australia por Robertson y Muchow (1994), y con las estimaciones de Robertson et al. (1997), quienes demostraron analíticamente que la *EUA* puede encontrarse entre 5,3 y 15,4 t ML^{-1} (citas obtenidas de Inman-Bamber y Smith (2005)). El aspecto más sobresaliente de los resultados obtenidos en esta tesis está constituido por la amplia variabilidad de la *EUA*, particularmente teniendo en cuenta que las condiciones agroecológicas y de manejo fueron mucho más acotadas que las incluidas en la recopilación de Robertson y Muchow (1994). Este comportamiento podría deberse a diversos aspectos, como la técnica de riego por inundación (caracterizada por

bajos valores de *EUA*, pero para la que se ha demostrado (Lecler et al., 2008) que con un manejo apropiado puede alcanzar niveles muy altos), combinada con un paisaje complejo, con una topografía ondulada y condiciones edáficas contrastantes. Otro aspecto que se puede resaltar es que la máxima *EUA* fue inferior a la *EUA* potencial del cultivo de caña de azúcar, lo que indica que el rendimiento del cultivo podría ser mayor dado el nivel de agua utilizada por el cultivo. No obstante, la comparación de valores de *EUA* en términos absolutos debe ser cautelosa, ya que pequeñas diferencias metodológicas y conceptuales entre trabajos pueden conducir a grandes diferencias en las estimaciones de eficiencia (Sinclair et al., 1984; Inman-Bamber et al., 1998; Inman-Bamber y Smith, 2005). En este sentido, a diferencia de las estimaciones realizadas en la presente tesis, que consideraron únicamente el agua transpirada por el cultivo, el cálculo de los valores citados consideró al uso del agua como la suma de ambas transpiración y evaporación. Por este motivo, la corrección de los valores de *EUA* obtenidos (adicionando a la transpiración estimada un 10% de evaporación) resultó en el rango 4,34-10,36 t ML⁻¹, para el cual siguen siendo válidos los comentarios presentados en este párrafo.

Las estimaciones de *EUR* (rango 2,04 - 4,18 g Mj⁻¹) son coherentes con los niveles estimados en cañaverales irrigados de Brasil, los que estuvieron en el orden de 2,67 (da Silva, 2009) y 1,66 a 3,12 g Mj⁻¹ (Ferreira Junior et al., 2008) (donde la *EUR* se calculó en base a la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo, RAFA). Debido a que en la literatura la *EUR* de caña de azúcar se expresa mayoritariamente en base a la radiación de onda corta interceptada (*EUR*_{OC}), para obtener una aproximación rápida al valor de *EUR*_{OC} se multiplicó la *EUR*_{RAFA} por el factor 0,484 (calculado como el cociente *EUR*_{OC}:*EUR*_{RAFA}, en base a estimaciones de *EUR* de caña de azúcar obtenidas por da Silva (2009)). Así, la *EUR*_{OC} resultante (rango 0,99 - 2,02 g Mj⁻¹) también fue coherente con la bibliografía, donde los máximos citados son de aproximadamente 2 g Mj⁻¹ (Muchow et al., 1997), mientras que los mínimos están en el rango 0,77 - 0,98 g Mj⁻¹ (Park et al., 2005; Singels et al., 2005)). Nuevamente, al igual que se observó para la *EUA*, el rango de variabilidad de *EUR* estimado en esta tesis abarca todo el rango citado en la bibliografía específica de caña de azúcar.

La variedad cultivada constituyó el factor más importante para la construcción de los árboles de clasificación de ambas eficiencias. Este resultado coincide con los hallazgos de Ferraro et al. (2009), que indican que la variedad de caña fue uno de los factores más importantes en la estructuración de los árboles de rendimiento de caña y de rendimiento de sacarosa. Retomando los resultados de esta tesis, debido a que ambas *EUA* y *EUR* respondieron en la misma dirección ante la plantación de una variedad u otra, la elección del genotipo permitiría incrementar la eficiencia en el uso de ambos recursos simultáneamente. Aquellas variedades que se destacaron por la baja variabilidad de sus eficiencias constituirían una buena elección ante escenarios de alta incertidumbre (por ejemplo climática) ya que asegurarían una relativa estabilidad. Si bien existen antecedentes sobre la relación entre el genotipo y la *EUA* o la *EUR* en la bibliografía internacional (por ej., Muchow et al., 1997; Ramesh y Mahadevaswamy, 1999; Donaldson, 2009; Sudhakar et al., 2010), aún se requiere una profundización en el tema, tal como lo señalan Zhou (2005) y Donaldson (2009). Además, son pocos o nulos los estudios que abordan este tema bajo las condiciones ambientales locales y con los genotipos utilizados en la región. Entre los mecanismos que regulan a una o ambas eficiencias, y que podrían tener un carácter hereditario, se encuentran el cierre

estomático, el acartuchamiento de la lámina, la abscisión foliar, el ajuste osmótico (Robertson et al., 1999; Inman-Bamber y Smith, 2005; Carr y Knox, 2011) y la partición de biomasa y de fotoasimilados (Singels e Inman-Bamber, 2011). Por último, la interacción genotipo x ambiente, un tópico poco estudiado en caña de azúcar (Lisson et al., 2005; Singels e Inman-Bamber, 2011), también debería ser considerada en un eventual programa de mejoramiento genético. Debido a la gran variabilidad observada para algunos genotipos, y a la existencia de antecedentes que advierten sobre este tema (Muchow et al., 1997; Ramesh y Mahadevaswamy, 1999; Singels y Smith, 2006), es probable que dicha interacción haya modulado algunas de las respuestas encontradas en esta tesis.

El factor edad tuvo una importancia variable para la construcción de los árboles de clasificación (media en el caso de la *EUA* y alta sobre la *EUR*). Sin embargo, adquirió gran importancia ya que en ambos árboles el grupo con la menor eficiencia estuvo caracterizado exclusivamente por la edad del cañaveral, concretamente por el estadio más joven (caña planta) y por los más viejos del estudio (socas 4 y mayores). Así, con el objetivo de alcanzar mayores *EUA* y *EUR* globales (de toda la rotación), la rotación no debería extenderse hasta el estadio soca 4. El estadio caña planta, por el contrario, no podría ser excluido de la rotación ya que constituye el primer año de la secuencia de cultivo, de manera que en esta etapa habría que manejar el cultivo tratando de maximizar ambas eficiencias. En relación con la *EUA*, Thompson (1976) (tomado de Yates y Taylor (1986)), en sintonía con los resultados aquí presentados, encontró que la eficiencia de caña planta fue menor que la de los primeros estadios de soca. En contraposición con los resultados de este autor y los de la presente tesis, Singh et al. (2007), bajo condiciones variables de irrigación y edáficas, hallaron que la mayor *EUA* fue alcanzada en caña planta, debido a que en este estadio el rendimiento fue mayor que en soca, siendo los niveles de evapotranspiración semejantes. Por el contrario, los resultados de esta tesis indicaron que mientras el rendimiento fue semejante entre estos estadios, el consumo de agua fue mayor en caña planta, consecuencia de una mayor longitud de ciclo (el rango intercuartílico en caña planta fue 372-537 días, contra 335-374 días para los estadios soca 1, 2 y 3 -datos no presentados-). En el caso de la radiación, todos los antecedentes encontrados sobre la respuesta de la *EUR* a la edad del cañaveral se contradicen con los resultados de esta tesis, e indican que la eficiencia es mayor en caña planta (Robertson et al., 1996; Keating et al., 1999; Park et al., 2005). Sin embargo, estos valores se refieren a la máxima *EUR* alcanzable en un estadio u otro, la cual normalmente se alcanza antes del final del ciclo de cultivo, por lo que la *EUR* anual resulta ser sensiblemente menor a la máxima (Park et al., 2005; Donaldson et al., 2008). Así, considerando la diferencia de longitud entre estadios observada en este estudio (ver el rango intercuartílico presentado en este párrafo), la mayor longitud que caracterizó a caña planta repercutiría en una reducción de su *EUR* anual (Figura 4.15.a), colocándola por debajo de los valores correspondientes a soca 1, 2 y 3. La *EUR* del estadio caña planta también fue menor a la de soca cuando se repitió el análisis controlando el factor longitud de ciclo ($t = 4,622$, $gl = 73$, $p < 0,0001$), lo que confirma la existencia de un efecto del estadio *per se*, además del atribuido a la longitud de ciclo. En el caso de la *EUA*, si bien el efecto del estadio *per se* no se comprobó estadísticamente, los datos parecieran indicar que existe tal efecto (resultados no presentados). Por último, las menores eficiencias estimadas para los estadios más viejos (soca 4, 5 y 7) pueden deberse al envejecimiento del cañaveral, que puede manifestarse como un aumento en la proporción de estructuras no fotosintéticas (y de sus costos respiratorios), a la pérdida de funcionalidad de aquellos órganos que se originaron

durante el primer año de vida del cultivo (caña planta) y, por último, a la alteración de las propiedades edáficas (físicas, químicas y/o biológicas) (Cadet et al., 2002; Bell et al., 2001; Pankhurst et al., 2005; Viator et al., 2006).

El efecto del mes de inicio (otro factor que tuvo una importancia media/alta sobre la construcción de los árboles de clasificación) puede haber sido una consecuencia directa de su influencia sobre el régimen térmico que experimenta el cultivo (Donaldson et al., 2008; Romero et al., 2010). De acuerdo con Humbert (1968), la exposición a temperaturas frías induce la madurez de los macollos, con una reducción de la actividad fotosintética y un aumento de la acumulación de sacarosa, mientras que con la posterior exposición a temperaturas cálidas se revierte este proceso. Sin embargo, los cultivos iniciados durante el verano presentan mayor edad al finalizar la estación fría, lo que limitaría la tasa de recuperación del cultivo a la salida del invierno, repercutiendo en un menor rendimiento a pesar de la mayor radiación interceptada (Donaldson et al., 2008). Otro mecanismo que podría estar involucrado en las respuestas observadas es un efecto indirecto de la longitud de ciclo: por ejemplo, éste factor nunca fue menor a los 490 días cuando el cultivo se inició en febrero o marzo, restringiendo así los valores potenciales de eficiencia (percentiles 95), tanto en el caso del agua como de la radiación (Figuras 4.6 y 4.15, respectivamente). Si bien estos mecanismos permitirían explicar algunos patrones observados, como los rangos de eficiencia bajos de los meses de renovación estival y altos de los meses invierno-primaverales, aún existe una alta superposición entre las estimaciones correspondientes a los períodos frío y cálido que hace pensar en la existencia de otro mecanismo, o bien de su interacción con otros factores. De este modo, parte del comportamiento que no pudo explicarse por el efecto del mes de inicio del ciclo de cultivo podría deberse a la fuerte interacción encontrada entre este factor y el genotipo (Romero et al., 2006; Donaldson et al., 2008).

La irrigación invernal tuvo efectos predominantemente negativos o neutros sobre las eficiencias estudiadas en este capítulo, de modo que ante incrementos en este factor las eficiencias disminuyeron o bien se mantuvieron constantes en niveles medios-bajos, respectivamente. De este modo, para alcanzar las mayores eficiencias la provisión de riego durante el invierno debería mantenerse en niveles bajos o nulos, con la precaución de que esta decisión también podría resultar en valores de eficiencia medios o bajos (ver figuras 4.5 y 4.13). En línea con estos resultados, durante los estadios iniciales la suspensión del riego invernal por hasta 5 meses (luego de un primer pulso de riego que asegure el brotado de las yemas) redujo el área foliar del cultivo pero no afectó el rendimiento (Robertson et al., 1999), aumentando así la *EUA*. Sin embargo, es probable que la respuesta al riego invernal esté fuertemente influenciada por la interacción con el agua total disponible durante el ciclo de cultivo. En relación con este factor, se podrían presentar dos escenarios extremos. Por un lado, conforme aumenta la disponibilidad hídrica aumentan las probabilidades de que la irrigación invernal (considerando que ocurre en el momento de menor evapotranspiración potencial) origine condiciones de anaerobiosis, con consecuencias negativas sobre la caña de azúcar (Inman-Bamber y Smith, 2005). En el otro extremo, ante un escenario de escasez hídrica, el agua aportada con la irrigación invernal podría almacenarse en el suelo y transferirse hasta que se reactive el crecimiento del cultivo, lo que reduciría el estrés hídrico, aumentando así ambas eficiencias (este podría ser el caso de los percentiles inferiores, que presentaron pendientes mayores a cero). Por último, se debe advertir que el programa de riego (definido por la cantidad y la frecuencia de riegos que conducen a la lámina que se pretende aportar), y que fue un factor no considerado en este estudio, puede tener

grandes implicancias sobre el efecto de la irrigación sobre el cultivo (Muchow y Keating, 1998; Quershi et al., 2002; Yahaya et al., 2010).

La longitud del ciclo, pese a su importancia media-baja sobre el armado de ambos árboles de clasificación, merece ser analizada ya que se cree que influyó en otros factores que sí tuvieron alta importancia sobre la construcción de los árboles (edad y mes de inicio), tal como ya fue discutido. La duración del ciclo de cultivo nunca afectó positivamente a las eficiencias, de modo que conforme se incrementó este factor se observó que las eficiencias más altas se redujeron, mientras que las más bajas se mantuvieron constantes. Además, cuanto mayor fue el nivel de eficiencia (mayores percentiles), más intensas fueron dichas reducciones (Figuras 4.6 y 4.15). A la luz de estas observaciones, el manejo debería ajustarse para que el ciclo no se extienda más allá de los 400 días. Como por debajo de este umbral el rango de eficiencias sigue siendo amplio, se debe monitorear que los niveles de eficiencia no caigan a valores medios o bajos. Seguramente, en este último punto se debería evaluar la interacción con otras prácticas (ver la discusión presentada para los factores mes de inicio y edad, en esta misma sección). En el caso particular de la *EUR*, la respuesta ante cambios en la longitud de ciclo puede estar relacionada con el fenómeno de reducción en el crecimiento (*RGP*, por sus siglas en inglés). El *RGP* consiste en una disminución en la *EUR* del cultivo a partir de determinado momento del ciclo de crecimiento anual (Robertson et al., 1996; Park et al., 2005; Donaldson et al., 2008; van Heerden et al., 2010). Así, incrementos en la duración del ciclo aumentan las probabilidades de que se sobrepase el umbral de la *EUR* máxima, lo que reduciría la *EUR* anual. Las causas que modulan el momento en que se alcanza este umbral no están identificadas, pero se postula que puede deberse a una combinación de factores, como por ejemplo el vuelco del cultivo, el contenido de nitrógeno foliar específico, la retroinhibición de la fotosíntesis mediada por la sacarosa, el aumento de la respiración de mantenimiento conforme va creciendo el cultivo, entre otros (van Heerden et al., 2010). Por otro lado, la respuesta negativa de la *EUA* ante incrementos del largo del ciclo se debió a que la extensión del ciclo tuvo un impacto positivo sobre la transpiración y el rendimiento, aunque fue proporcionalmente menor sobre el último. Por lo tanto, considerando que el *RGP* puede haber restringido el incremento del rendimiento, este fenómeno también podría estar involucrado en la caída de la *EUA*.

A diferencia de lo que se observó para la *EUA*, la *EUR* estuvo fuertemente influenciada por el año de zafra. Cuando se estudió si algún otro factor estaba involucrado en este comportamiento se encontró que la frecuencia de los estadios con menor *EUR* (caña planta y soca 4 o mayores) fue del 55% en la zafra 2002, y se redujo al 20-25% en las zafras 2003, 2004 y 2005, lo que explicaría la menor *EUR* del 2002 (resultados no presentados). Por el contrario, no se encontró una asociación clara entre la *EUR* y distintos factores ambientales (datos no presentados). Estos resultados sugieren que el efecto del año de zafra se debió en gran medida a un efecto indirecto de la edad del cañaveral. De todos modos, para descartar la existencia de un efecto del año de zafra *per se*, o que sea producto de su interacción con algún otro factor, se debería realizar un análisis más exhaustivo que incluya mayor cantidad de factores ambientales y distintos niveles de algunos de los factores de manejo aquí estudiados.

Por último, la identidad de las parcelas es un aspecto que no fue tenido en cuenta en este análisis y que podría afectar los resultados. Existe la posibilidad de que un grupo de parcelas haya tenido un comportamiento estable e insensible al manejo, atribuible a alguna limitante ambiental (ej. edáfica), que resulte en valores de *EUA* y/o *EUR*

extremadamente bajos. De ser así, las eficiencias de aquel o aquellos tratamientos que fueron asignados a estas parcelas estarían subestimadas. De todos modos, para los cañaverales en estudio se postuló que el manejo sitio-específico habría superado el efecto negativo ocasionado por los sitios pobres (Ferraro et al., 2009), restándole importancia al hecho de que no se haya considerado la identidad de las parcelas.

4.5. CONCLUSIONES

Los resultados de este capítulo indican que ambas *EUA* y *EUR* estuvieron fuertemente influenciadas por las variables estudiadas y, por lo tanto, son de utilidad para delinear estrategias de manejo que permitan manipular las eficiencias del cultivo. A partir de los árboles de clasificación obtenidos surge que para alcanzar los mayores niveles de *EUA* se debería mantener al cañaveral en los estadios soca 1, 2 o 3, lo que debería complementarse con dos estrategias de manejo distintas. En aquellos casos en que el ciclo de cultivo se inicie en el mes de septiembre, dichos estadios deberían combinarse con la elección de las variedades 8 (NA 85 1602) o 9 (TUC 72 16) (nodos 6 y 7, respectivamente). Pero cuando el inicio ocurre en un mes distinto de septiembre, entonces los estadios soca 1, 2 y 3 deberían coincidir con la plantación de la variedad 2 (CP 70 1133) (nodo 10). Desde el punto de vista de la *EUR*, la estrategia de manejo que conduciría a las mayores eficiencias consistiría en mantener al cultivo en los estadios soca 1, 2 o 3, reproducir alguna de las condiciones de manejo y/o ambientales enmascaradas detrás del efecto de las zafras 2004 y 2005 (el cual no pudo ser dilucidado en este estudio) y, por último, evitar el riego invernal o reducirlo a 1 evento (nodos 15, 16 y 17). Por el contrario, los menores niveles de ambas *EUA* y *EUR* están definidos por un solo factor, la edad del cañaveral, concretamente por los estadios caña planta y socas 4 o mayores (nodos 3). Así, para evitar que ambas eficiencias sean mínimas se debería renovar el cañaveral antes de que alcance el estadio soca 4 y, respecto al estadio caña planta, se debería identificar la/s estrategias de manejo que permiten mantener los valores de *EUA* y *EUR* tan altos como sea posible. Como se puede apreciar, estos resultados indican que para alcanzar los mayores niveles de eficiencias las variables predictoras analizadas interactúan de manera compleja, y con efectos que difieren según se trate de la *EUA* o la *EUR*. Esto representa un desafío a la hora de delinear estrategias de manejo que puedan ser puestas en práctica con facilidad, al tiempo que limita las posibilidades de alcanzar simultáneamente altos niveles de *EUA* y *EUR*. Por el contrario, los menores niveles de ambas eficiencias fueron alcanzados en respuesta a un único y mismo factor, lo que simplifica la implementación de medidas para evitar esta situación.

Aparte de los factores enumerados en el párrafo previo, existen otros que también deberían ser contemplados a la hora de delinear estrategias de manejo que modulen ambas eficiencias. Así, tanto la longitud del ciclo de cultivo como la lámina de riego invernal afectaron de manera negativa los valores potenciales de *EUA* y *EUR*. Por este motivo, se debería evitar que la duración del ciclo sea mayor a los 400 días y que la lámina de riego supere los 200 mm para que las eficiencias no estén restringidas. Sin embargo, si bien por debajo de estos umbrales los valores potenciales son altos, las eficiencias también podrían caer a niveles muy bajos. Esto obliga a supervisar la respuesta del cultivo y, al mismo tiempo, abre nuevos interrogantes que habría que seguir estudiando.

Capítulo 5

Sustentabilidad ecológica de los sistemas de producción intensivos de caña de azúcar del NOA: análisis centrado en las dinámicas del agua y la energía en los ecosistemas.

5.1. INTRODUCCION

Un ecosistema es sustentable cuando es capaz de mantener constantes distintos atributos (como por ejemplo la diversidad de grupos funcionales, la productividad, la fertilidad edáfica y las tasas de los ciclos biogeoquímicos) ante determinado régimen de disturbios (Chapin et al., 1996). En este contexto, el agua constituye un recurso que impone un fuerte control sobre el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas y que, por lo tanto, merece ser monitoreados al estudiar su sustentabilidad. Su importancia radica en la influencia que ejerce no sólo sobre los procesos biológicos en general, sino también sobre los ciclos biogeoquímicos y el balance de energía superficial, directamente vinculado con el clima (Jackson et al., 2001; Chapin et al., 2002).

De acuerdo con Gleik (2000), el uso de agua dulce se incrementó aproximadamente siete veces durante el siglo XX y se estima que seguirá aumentando durante las próximas décadas. Considerando que la agricultura utiliza el 85% del total del agua dulce que es consumida globalmente (Hoekstra y Chapagain, 2007), este sector de la economía debe asumir la responsabilidad de hacer un uso racional del agua. Los elevados volúmenes de agua insumidos por la agricultura representan una transferencia de vapor de agua hacia la atmósfera como consecuencia de la evapotranspiración. Debido a que el vapor de agua es uno de los gases con efecto invernadero más importantes de la atmósfera, esto puede tener repercusiones sobre el clima y las condiciones meteorológicas, con consecuencias a nivel regional e incluso global (Jackson et al., 2001; Bounoua et al., 2002). Por otro lado, los cambios de vegetación como la agricultura, además de insumir grandes volúmenes de agua dulce, pueden tener consecuencias sobre la regulación de las inundaciones, las napas freáticas y la salinización de los suelos, entre otros, efectos que son el resultado de alteraciones del balance de agua y el flujo de sales de los ecosistemas (Jobbagy et al., 2008).

Existen distintos índices que pueden utilizarse para estudiar el consumo de agua por parte de las actividades agrícolas y, por otro lado, cómo este proceso puede alterar al ciclo hidrológico y los ecosistemas. Por ejemplo, la magnitud de los compartimentos (rizósfera, napa, cuerpos de agua superficiales, acuíferos, etc.) y de los flujos (evaporación, transpiración, precipitación, percolación, etc.) involucrados en el ciclo del agua ha demostrado ser de utilidad para caracterizar diversos impactos de la agricultura (Scanlon et al., 2005; Jobbagy et al., 2008). La eficiencia en el uso del agua (*EUA*), un índice que engloba las dimensiones ecológica y económica de la sustentabilidad, permite guiar el manejo en busca de maximizar el rendimiento o bien de minimizar el agua insumida (Keating et al., 2010), dos objetivos interesantes en un contexto de escasez hídrica.

Otro índice que resulta de interés para monitorear la sustentabilidad de las prácticas agrícolas es la eficiencia en el uso de la radiación solar (*EUR*). Su importancia se debe principalmente a que la radiación solar (a diferencia de lo que ocurre con el agua o los nutrientes) constituye un recurso cuya disponibilidad no puede modificarse a través del manejo del agroecosistema. Por lo tanto, caracterizar la respuesta de la *EUR* de un cultivo permitiría guiar el manejo en pos de maximizar su valor. Además, el inminente agotamiento de las reservas de combustibles fósiles suscitó un creciente interés por elaborar biocombustibles a partir de distintos cultivos agrícolas. La *EUR* también resulta de interés ante este panorama, ya que permite evaluar el rendimiento de los cultivos (que podrían expresarse en unidades de energía) en función de la radiación solar, principal entrada de energía en los ecosistemas. No obstante, canalizar una mayor

proporción de la radiación solar hacia biomasa vegetal y, particularmente, hacia órganos cosechables, puede afectar el funcionamiento del ecosistema como consecuencia de alteraciones sobre la red trófica y el balance de energía superficial, entre otros efectos (Chapin et al., 2002).

El cultivo de la caña de azúcar provee distintos bienes de primera necesidad, tales como azúcar, papel y biocombustibles, articulando fuertemente para ello con el sector industrial. Este aspecto, sumado a la extensa superficie ocupada por el cultivo en el NOA, determinan que la cañicultura constituya un eslabón fundamental de la socioeconomía regional. No obstante, se trata de un cultivo que puede ocasionar diversos impactos ambientales, con efectos que pueden tener influencias incluso a escala regional (Cheesman, 2004). Entre los impactos recopilados por este autor se encuentran la sobreexplotación de las reservas de agua dulce, la contaminación de los cursos de agua con agroquímicos y partículas edáficas, la erosión de suelos, la contaminación atmosférica por efecto de la quema del cultivo previo a la cosecha y la pérdida de biodiversidad.

El objetivo del presente capítulo fue diagnosticar la sustentabilidad de la producción intensiva de caña de azúcar del NOA desde el punto de vista de las dinámicas del agua y la energía. Para ello se analizaron los resultados obtenidos de *EUA* y *EUR* (capítulo 4), de transpiración (t) (capítulo 3) y el cociente entre la transpiración y el agua total disponible (t/ATD , capítulo 3) bajo la óptica de la sustentabilidad. Por último, se debe aclarar que este análisis se refirió exclusivamente a las prácticas agrícolas, mientras que no se consideraron los impactos del procesamiento industrial de la caña de azúcar.

5.2. MATERIALES Y METODOS

La *EUA* se estimó como el cociente entre el rendimiento de macollos de caña de azúcar ($t \text{ ha}^{-1}$) y la lámina de agua transpirada por el cultivo (mm ha^{-1}) durante todo el ciclo de crecimiento, de acuerdo con los detalles metodológicos presentados en los capítulos 3 y 4. La estimación de la *EUR* se realizó a partir del cociente entre la biomasa total aérea (g m^{-2} , expresada en base seca) producida por el cultivo y la radiación fotosintéticamente activa que es absorbida por el cañaveral durante el ciclo de producción (Mj m^{-2}) (ver capítulo 4). Para estimar la t (capítulo 3) (indicador que también participa en el cálculo de la *EUA*) se calculó el producto entre los siguientes factores: la evapotranspiración potencial (ET_0), el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y el coeficiente de estrés hídrico (K_s). La t fue estimada en una base diaria y luego integrada para representar la totalidad del ciclo de cultivo. Por último, el indicador t/ATD se estimó como el cociente entre t y el agua total disponible para el cultivo (ATD), donde el ATD fue calculado como la diferencia entre el contenido hídrico del suelo en capacidad de campo y en punto de marchitez permanente, para el perfil edáfico explorado por las raíces, el cual fue actualizándose a lo largo del ciclo de cultivo (capítulo 2).

En el caso de *EUA* y *EUR* se analizaron nuevamente los resultados obtenidos en el capítulo 4 pero desde el punto de vista de la sustentabilidad de los ecosistemas. Para los indicadores t y t/ATD se siguió el mismo procedimiento pero en base a los resultados del capítulo 3 y, además, se realizaron nuevos análisis de datos.

Así, a partir del valor de t se caracterizó la relación entre los requerimientos de riego de una superficie determinada y el caudal residual del río San Francisco (uno de los principales ríos de la Provincia de Jujuy y el que provee el agua de riego para el área de cultivo en estudio). Para ello, el valor de t fue convertido de lámina de agua (mm año^{-1}) al respectivo caudal ($\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$, o sea, el volumen total de agua que se pierde a lo largo del año, desde una superficie de referencia). Luego, se calculó la diferencia entre a) el caudal disponible en el río San Francisco, calculado como el caudal promedio anual (período 2001-2005, estación caimancito, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina) menos el caudal de mantenimiento ($15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, Ruiz Palacios et al., 1982), y b) el requerimiento de riego, estimado como el caudal transpirado por año, menos la precipitación media anual. El valor obtenido constituye una estimación del caudal remanente o residual en el río. Para este análisis se consideraron los escenarios hipotéticos que surgen de combinar tres variables: a) requerimientos hídricos del cultivo de caña de azúcar (niveles mínimo y máximo, presentados en el párrafo previo), b) eficiencia del sistema de irrigación (25%, 50%, 75% y 100%) y c) superficie bajo cultivo.

Por otro lado, en función del indicador t/ATD (cuya importancia radica en que permite describir qué porcentaje del agua disponible para el cultivo se convierte a la fase de vapor por efecto de la transpiración) se realizaron dos nuevos análisis. En primer lugar se estudió su respuesta ante incrementos en el valor del ATD mediante un análisis de regresión lineal, evaluando si tanto la pendiente como la ordenada al origen eran estadísticamente distintas de cero (test F, nivel de $\alpha 0,05$). En segundo lugar se aplicó la técnica de CART (ver capítulo 3) para indagar sobre la respuesta del indicador t/ATD ante cambios en distintas variables (tabla 4.1).

La presentación de los resultados comenzó con el análisis de la sustentabilidad en base a ambas EUA y EUR . Luego se analizó la sustentabilidad desde la óptica de los otros dos indicadores, t y t/ATD . Esta segunda parte fue estructurada según los impactos potenciales de la cañicultura comprometan *a)* a los recursos hídricos, *b)* a los sistemas terrestres o *c)* al sistema conformado por la superficie de la Tierra conjuntamente con la atmósfera. De todos modos, se debe resaltar que esta clasificación constituye una simplificación de la realidad introducida a los fines de facilitar este análisis, ya que una modificación de cualquiera de dichas clases repercutiría sobre las restantes a mediano o largo plazo.

5.3. RESULTADOS

5.3.1. Eficiencias en el uso del agua (EUA) y de la radiación (EUR)

Como se mencionó en el capítulo previo, ambas eficiencias presentaron valores que abarcaron todo el rango de variabilidad documentado en la bibliografía específica de caña de azúcar.

En relación con la respuesta de ambas EUA y EUR ante los distintos factores considerados, tanto la edad del cañaveral como la variedad cultivada presentaron la mayor influencia (ver capítulo 4). Para el primero de los factores se encontró que las menores eficiencias se correspondieron con los estadíos CP y S4 y mayores (i.e., cañaverales recién renovados y aquellos con una edad igual o mayor a los 5 años).

Respecto al efecto de la variedad, los genotipos con las mayores eficiencias presentaron al mismo tiempo registros con bajos niveles de eficiencia, producto de una alta variabilidad fenotípica. Otros genotipos, por el contrario, presentaron una alta estabilidad de las eficiencias, aunque en estos casos los niveles fueron medios o bajos, dependiendo de cada variedad.

Los efectos del mes en que se inicia el ciclo de cultivo y del mes de cosecha se caracterizaron por tener una alta incertidumbre. Así, pese a que algunos niveles de dichas variables se pudieron asociar a valores extremos de *EUA* y *EUR*, debido a la gran dispersión de los datos existió una alta superposición de valores de eficiencia entre los distintos meses estudiados.

El riego invernal estuvo inversamente relacionado con ambas eficiencias en el uso del agua y de la radiación, de manera que ante incrementos de la asignación hídrica disminuyeron los máximos niveles de eficiencia alcanzados por el cultivo.

5.3.2. Transpiración del cultivo (t) y su relación con el agua total disponible (t/ATD)

El rango de transpiración estimado para el cultivo de caña en el NOA y bajo manejo intensivo fue de 913 a 1655 mm ciclo⁻¹, valores promedio correspondientes a los grupos con la menor y mayor t , respectivamente (ver capítulo 3, árbol de clasificación).

Se encontró una relación inversamente proporcional entre la superficie cultivada bajo riego y el caudal residual, al tiempo que la reducción de dicho caudal fue proporcionalmente mayor cuanto menor fue la eficiencia de irrigación (Figura 5.1). Además, en los gráficos se observa la respuesta de la superficie cultivable máxima (i.e., la superficie con que el requerimiento de riego iguala el caudal de mantenimiento 15m³ s⁻¹) ante cambios en las otras variables. Así, cuando se consideró el escenario de transpiración máxima (figura 5.1 b), la superficie cultivable máxima estuvo en el rango

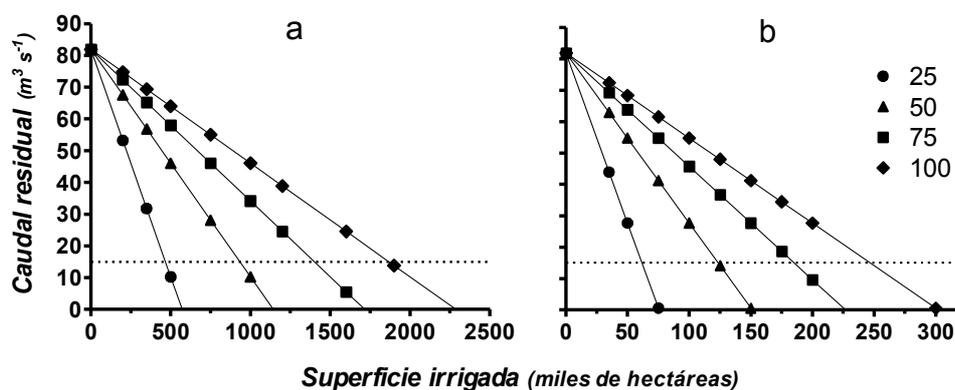


Figura 5. 1. Valores estimados de caudal residual (m³ s⁻¹) del río San Francisco en función de la superficie irrigada (has), considerando distintos niveles de eficiencia del sistema de irrigación y los requerimientos hídricos mínimo (a) y máximo (b) del cultivo de caña de azúcar. La línea punteada corresponde al caudal de mantenimiento (15 m³ s⁻¹).

64.541 a 248.109 has (2,5 y 9,8% de la superficie de la cuenca del río San Francisco) ante eficiencias de irrigación de 25 y 100 %, respectivamente. Por el contrario, en el caso de la transpiración mínima (figura 5.1a), y dependiendo de la eficiencia de irrigación, las superficies fueron 480.720 y 1.872.300 has (19 y 73.9% en relación con el área de la cuenca).

Cuando se estudió el comportamiento del cociente t/ATD ante incrementos en el ATD (Figura 5.2), se encontró una respuesta de tipo lineal, con una reducción del 2% cada 100 mm de aumento del ATD ($r^2 = 0.6956$, pendiente estad. distinta de cero, $p < 0,0001$). Los valores de t/ATD máximo y mínimo predichos por el modelo ajustado son del 88% y 48,5%, y se corresponden con niveles de ATD de aprox. 1000 y 3000 mm ciclo⁻¹, respectivamente.

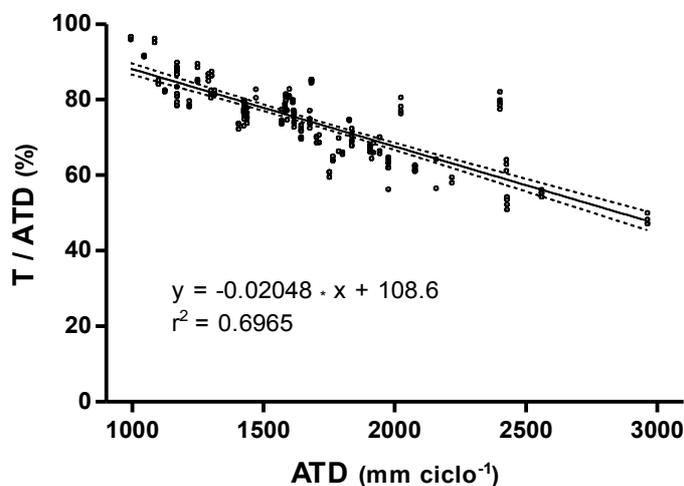


Figura 5.2. Cociente entre la transpiración y el agua total disponible (t/ATD) en función del ATD a lo largo del ciclo de producción.

A continuación se presenta la respuesta del cociente t/ATD ante distintas variables culturales y ambientales (análisis basado en la técnica de CART considerando las ocho variables predictoras descritas en la Tabla 3.1, resultados no presentados). El árbol obtenido estuvo conformado por ocho grupos terminales. De éstos, aquel con el mayor valor promedio de t/ATD (i.e., casi la totalidad del agua disponible para el cultivo se convierte en vapor) se diferenció por una sola condición: la cosecha no se realizó en los meses de julio ni agosto. Por el contrario, los grupos para los que dicho cociente alcanzó los valores más bajos estuvieron representados por parcelas cosechadas en julio o agosto y, además, con ciclos de una duración mayor a 365 días. Otras variables predictoras que influyeron sobre la estructuración del árbol fueron el genotipo y el año de zafra.

5.4. DISCUSION

5.4.1. Eficiencias en el uso del agua (EUA) y de la radiación (EUR)

En términos relativos, la gran variabilidad observada para ambas eficiencias se tradujo en que los valores máximos tanto de la EUA como de la EUR superaran por más de un 100% a los valores mínimos. En el caso del agua, esto significa que para alcanzar

una producción de 90 t ha^{-1} (valor medio de productividad en las fincas del área de estudio manejadas por Ledesma S.A.A.I.), los requerimientos mínimos y máximos de agua sean de $780\text{-}1875 \text{ mm ciclo}^{-1}$. Así, considerando que la precipitación media es de 800 mm año^{-1} , aproximarse a la *EUR* máxima permitiría que la producción se realice prácticamente sin riego suplementario, mientras que cuando la eficiencia esté cerca del mínimo se requeriría un aporte por irrigación cercano a los $1000 \text{ mm ciclo}^{-1}$ (no se consideraron en este cálculo las ineficiencias de conducción y aplicación de riego, producto de las cuales la necesidad de irrigación aumentaría sensiblemente). La ocurrencia de una u otra situación tendría grandes implicancias sobre los posibles recorridos del agua en el ciclo hidrológica y sobre el caudal de los ríos (dichas implicancias se analizarán en la próxima sección).

En el caso de la radiación, tomando como referencia un valor medio de la *RFA_a* estimada en el capítulo previo (1350 Mj m^{-2}), si el cultivo alcanzara niveles de *EUR* cercanos al mínimo o al máximo observados, se obtendrían rendimientos de 51 o de 105 t ha^{-1} , respectivamente. Como se aprecia en este ejemplo, y considerando que la magnitud de radiación solar disponible por unidad de superficie no puede ser modificada a través del manejo, los cambios en la *EUR* impactan directamente sobre la productividad por hectárea. Entonces, incrementando la *EUR* se podría dar respuesta a la creciente demanda de caña de azúcar minimizando la expansión de la frontera agrícola y los potenciales impactos ambientales. De modo similar, si asumimos que el contenido de energía de los tejidos cosechados puede considerarse relativamente constante (Patzek y Pimentel, 2005), un aumento en el rendimiento ante una cantidad constante de radiación solar absorbida representa una mayor eficiencia de “apropiación” de la energía. Este aspecto es de gran importancia ante la elaboración de etanol a partir del azúcar de caña, ya que se traduciría en un aumento de la energía que se puede obtener por unidad de radiación absorbida y de superficie (dos insumos cuya oferta no puede ser alterada por el manejo). De todos modos, el verdadero beneficio de una mayor apropiación de la radiación solar sólo se apreciaría al realizar un balance global de energía, comparando la energía contenida en el etanol con el total de la energía insumida para que el producto esté listo para su consumo (lo que involucra la producción agrícola, la industrialización y el transporte, principalmente) (Pimentel et al., 1973; Patzek y Pimentel, 2005; Ferraro, 2008).

Desde otro punto de vista, cuando el manejo se oriente hacia una maximización de la *EUR*, será prioritario monitorear el impacto de esta medida sobre el flujo de energía y la estructura de la red trófica, ya que podría tener consecuencias indeseables sobre el funcionamiento de los ecosistemas. A modo de ejemplo, un incremento de la *EUR* a expensas de un mayor índice de cosecha del cultivo podría reducir el flujo de energía hacia el gremio de los descomponedores. Esto se asociaría a una menor actividad biológica y un menor contenido de materia orgánica, con el consecuente deterioro de las propiedades físico-químicas del suelo (Bell et al., 2001; Blanco-Canqui y Lal, 2009).

En relación con el efecto de la edad sobre ambas eficiencias, los resultados indican que para aumentar los valores de eficiencia promedio de toda la rotación se debería reducir la edad de renovación. Sin embargo, con esta estrategia se incrementaría la frecuencia con que se realizan las prácticas asociadas a la renovación del cañaveral (sistematización del terreno y labores pre-implantación) y los respectivos costos energéticos. Por lo tanto, se debería analizar cuál es la edad óptima de renovación, ya que con un acortamiento excesivo de la rotación podría reducirse el balance global de

energía, perdiéndose el beneficio del aumento de la *EUR*. También se debería considerar que si se reduce la edad renovación aumenta la frecuencia de años en que el suelo se encuentra laboreado y sin cobertura, con el consecuente riesgo de erosión hídrica, lo que implica un elevado riesgo de contaminación de los cursos de agua y una disminución de la fracción del total de agua disponible que es utilizada por el cultivo.

Respecto al efecto del genotipo, debido a la alta heterogeneidad observada su elección no garantizaría el aumento del rendimiento del cultivo por cada unidad de agua y/o radiación insumida. Si bien existen diversos estudios sobre las variedades cultivadas en la región, tanto en lo referido a su identidad como a comportamiento (Jerez et al., 2002; Cuenya et al., 2005; Romero et al., 2009; Ostengo et al., 2011), en ningún caso se caracterizaron las eficiencias de los genotipos ni su interacción con distintas variables ambientales. Ante este contexto, surge la necesidad de realizar nuevos ensayos para dar respuesta a este interrogante, rumbo que condujo a buenos resultados en otros países en que se cultiva la caña de azúcar (Ramesh y Mahadevaswamy, 1999; Olivier y Singels, 2003; Singh et al., 2006; Sudhakar et al., 2010). Sin embargo, mientras este conocimiento no esté disponible sería conveniente disminuir riesgos en base a una diversificación de los genotipos cultivados (Cuenya et al., 2005), los cuales podrían seleccionarse en función de uno o más caracteres de interés agronómico. Si bien esta estrategia involucraría una gran complejidad operativa, permitiría obtener una mayor estabilidad a escala de establecimiento debido a que los genotipos pueden diferir cuali/cuantitativamente en su respuesta, por ejemplo, ante distintos factores de estrés, redundando finalmente en una mayor sustentabilidad.

La elevada variabilidad observada para los factores fechas de inicio del ciclo de cultivo y de cosecha determinan que, conforme no se disponga de mayor conocimiento sobre el efecto de estos factores, convendría adoptar medidas precautorias. Estas consistirían en manejar al cultivo en base a los niveles que en ningún caso condujeron a eficiencias bajas, pese a que no se pueda asegurar si la eficiencia resultante será alta o media. Simultáneamente, este esquema debería evitar que la elección de los meses de inicio del ciclo y de cosecha conduzca a una marcada sincronización del calendario de cultivo. Caso contrario, tal como se mencionó en el caso de la elección de los genotipos (párrafo previo), se presentaría una situación de gran vulnerabilidad ante factores de riesgo (tanto ecológico como económico), sumado a que la capacidad operativa del ingenio podría verse superada, redundando en la pérdida de sustentabilidad del esquema de manejo.

Por el contrario, las decisiones de manejo vinculadas al riego invernal sí permiten influir deliberadamente sobre ambas *EUA* y *EUR*. Así, desde el punto de vista de la sustentabilidad de la producción de caña de azúcar sería recomendable evitar o minimizar la irrigación invernal del cultivo, lo cual se contrapone con observaciones frecuentes realizadas en la zona de estudio (Ghersa y Rivero, datos no publicados). Como se mencionó en el capítulo previo, el riego invernal podría dar lugar a condiciones de anaerobiosis originadas por el ascenso de la napa freática, agravado en algunos casos por la migración de sales hacia la rizósfera, dos condiciones que reducen el crecimiento del cultivo de caña de azúcar (Wiegand et al., 1996; Fida Hasan et al., 2003; Inman-Bamber y Smith, 2005). Por otro lado, se debe agregar que como durante la estación fría los stocks de los cursos de agua presentan su nivel mínimo, se maximizan los potenciales perjuicios de la extracción de agua con fines de irrigación. Esto se debe a que puede conducir a una pérdida sustancial de caudal, comprometiendo

a diversos usos alternativos y reduciendo el poder buffer ante posibles contaminantes, sean éstos de origen agrícola o no.

Respecto al efecto de la longitud de ciclo, los ciclos largos están asociados principalmente a la plantación realizada durante el verano, de manera que son difíciles de acortar ya que normalmente ocurren por falta de capacidad operativa (Ing. S. Fadda, Ledesma SAAI, comunicación personal). Esto responde a que la cosecha suele extenderse hasta fines de la primavera debido a que no puede completarse durante la estación invernal -fecha óptima desde el punto de vista del rendimiento-. Entonces, en estos casos la plantación del nuevo cañaveral no puede realizarse durante el invierno, por lo que queda relegada y se concreta recién durante el verano. Por lo tanto, evitar la plantación estival con el fin último de reducir la longitud de ciclo involucra cambios estructurales difíciles de concretar. Ante este panorama se sugiere, en primer lugar, identificar aquellas situaciones en las que los bajos niveles de *EUA* y *EUR* tengan mínimas repercusiones ambientales. Luego, en base a esta información se debería planificar tanto espacial como temporalmente la ocurrencia de las ineficiencias asociadas a la longitud de ciclo y la renovación estival, y combinarlas con determinadas prácticas de manejo que permitan atenuarlas aún más.

Por último, se debe aclarar que en muchas ocasiones forzar al agroecosistema para que alcance altos niveles de *EUA* y/o de *EUR* involucra un manejo intensivo del mismo. Sin embargo, estas condiciones de manejo, generalmente caracterizadas por un alto nivel de subsidios, pueden originar distintos impactos sobre el sistema (como ya se mencionó en esta sección respecto a la maximización de la *EUR* y el riesgo de interrumpir el flujo de energía hacia los descomponedores). Por este motivo, sería aconsejable el uso de otros indicadores que permitan evaluar el estado de distintos componentes del agroecosistema y, con estos, tener una idea más acabada sobre la sustentabilidad del esquema de manejo. En base a estos indicadores se debería delinear un plan de monitoreo junto con las respectivas medidas de restauración o mitigación que permitan revertir los efectos de un eventual impacto negativo.

5.4.2. Transpiración del cultivo (*t*) y su relación con el agua total disponible (*t/ATD*)

El rango de transpiración estimado para el cultivo de caña en el NOA superó tanto a la precipitación media anual característica del área en estudio (800 mm) como a la evapotranspiración de las yungas (720 mm año⁻¹, según Viglizzo et al. (2011)), ecosistema nativo representativo de la región. Esto significa que el reemplazo de la cobertura vegetal ocasionado por el cultivo de caña de azúcar aumentaría los requerimientos hídricos de la vegetación en un rango de entre 193 y 935 mm año⁻¹, en promedio, los cuales deberían satisfacerse casi por completo a expensas de la irrigación. Se debe resaltar que mientras en el caso de las yungas se presentó el valor de evapotranspiración, para los cañaverales se estimó la transpiración del cultivo, ya que no se incluyeron las pérdidas de agua por evaporación directa desde el suelo y canopeo. Si bien se asume que la evaporación no alcanza una magnitud significativa (los argumentos que respaldan esta afirmación se presentaron en el capítulo 2), su valor, por pequeño que sea, resultaría en una diferencia aún mayor entre los requerimientos hídricos de ambas coberturas vegetales.

Este incremento en el consumo de agua debido al reemplazo de los ecosistemas nativos por el cultivo de caña de azúcar puede ocasionar distintos impactos (Jackson et al., 2001). Estos impactos pueden clasificarse en función de si éstos afectan en primera instancia A) a los recursos hídricos, B) a los sistemas terrestres o C) al sistema conformado por la superficie de la Tierra conjuntamente con la atmósfera.

En primer lugar, en el caso de los recursos hídricos (A) se pueden ocasionar impactos tales como, por ejemplo, una reducción de la capacidad de carga de seres vivos, menores capacidades buffer ante la contaminación con agroquímicos y de transporte de sedimentos propios del río, una reducción en la provisión de distintos servicios de interés para la sociedad (irrigación, bebida, recreación, usos industriales, transporte, etc.) (Longfield y Macklin, 1999; Jackson et al., 2001; Worrall et al., 2003; Whitehead et al., 2009).

La severidad de estos impactos depende entre otros factores de la circulación de agua por los cursos superficiales (Whitehead et al., 2009), esto es, del caudal residual del río San Francisco para el caso en estudio, el cual puede ser fuertemente alterado por el manejo (Figura 5.1). Así, aquellas situaciones que incrementen sustancialmente los requerimientos de irrigación, sea por la vía de cambios culturales que incrementen el uso de agua del cultivo o bien por la ocurrencia de años más secos, pueden tener una profunda repercusión sobre el caudal del río San Francisco. El análisis presentado en la figura 5.1 involucra los flujos de agua correspondientes a un período anual. Para lograr un abordaje más completo de la temática, esta aproximación se debería complementar con una escala temporal más detallada, poniendo el foco en aquellos períodos del año con máximos requerimientos hídricos y también en los que el caudal del río se encuentre en su mínimo nivel. Esto responde a que tanto las necesidades de irrigación como el caudal del río presentan una fuerte estacionalidad, la cual podría ocasionar un desbalance entre la demanda y la oferta de agua que podrían no ser detectados si se considera únicamente la escala anual.

Por otro lado, debido a la mencionada relación entre el caudal residual y la magnitud de los impactos que afectan a los cursos de agua, las autoridades que regulan el uso de los ríos adquieren un rol protagónico. Así, no sólo deberían definir el caudal de mantenimiento en base a un criterio integrador y flexible, que permita reajustar su valor en función de cambios ambientales, sino que además deberían asegurar su monitoreo con la frecuencia adecuada.

Otro aspecto importante relacionado con el impacto sobre los recursos hídricos es la interacción entre las precipitaciones y la cobertura vegetal, producto de la cual los ríos pueden desbordar de su cauce natural. De acuerdo con Brown et al. (2006), el reemplazo de bosques de yungas por sistemas agrícolas fue uno de los factores desencadenantes de las grandes inundaciones registradas en la temporada 2005-2006 en los ríos de la región. En general, como consecuencia de este cambio en la cobertura se puede incrementar el caudal de los ríos luego de eventos lluviosos, producto de una disminución de la interceptación por parte de la vegetación y de ambas infiltración y almacenaje en el suelo, y, por otro lado, de un aumento de la escorrentía superficial (Bosch y Hewlett, 1982; Guo et al., 2008). Estos procesos ocurren principalmente como consecuencia de cambios en la estructura del canopy (se reduce la biomasa aérea por efecto de la agriculturización de las tierras boscosas) y de su fenología (mientras las yungas presentan una cobertura total y permanente del suelo, los agroecosistemas presentan una fuerte estacionalidad, con períodos del año en que la cobertura es mínima

o nula). Existen distintas estrategias que serían de utilidad para atemperar este impacto. Por ejemplo, un primer paso podría ser realizar un ordenamiento territorial basado en la identificación de áreas de máxima vulnerabilidad, definidas por ejemplo por sectores de la cuenca que se encuentren con características de pendiente que aumenten considerablemente el riesgo de escorrentía superficial, o bien por las franjas de tierras que acompañan a los cursos de agua (corredores riparios). Entonces, para estas áreas se podrían definir criterios de manejo particulares que, en función del grado de riesgo, incluyan a una o más de las siguientes prácticas: restringir su uso a coberturas boscosas (las cuales podrían estar basadas, o no, en especies nativas); favorecer un aumento de la cobertura del suelo (por ej., reemplazar la cosecha precedida por la quema del cultivo por la cosecha en verde; procurar que las extracciones de materia orgánica para la industria de biocombustibles dejen una cantidad de residuos suficiente para controlar la escorrentía; entre otras); adecuar el calendario de tareas para evitar que el suelo quede sin cobertura durante la época lluviosa (se debería restringir la renovación del cañaveral durante los meses de verano); cuando la pendiente sea pronunciada y/o larga, promover el cultivo por curvas de nivel o la realización de terrazas de cultivo; aumentar la edad de renovación del cañaveral para disminuir la frecuencia de años en que el suelo se encuentra laboreado y sin cobertura; entre otras.

Además de los potenciales impactos ocasionados sobre los recursos hídricos (A), el comportamiento del cociente t/ATD (Figura 5.2) permite analizar aquellos que repercuten sobre los sistemas terrestres (B). En primer lugar, se debe resaltar que del total del agua disponible para el cultivo, solamente de un 10 a un 50% permanecieron en los sistemas terrestres y en estado líquido (el resto fue transferido a la atmósfera como vapor de agua). Por otro lado, dependiendo de la interacción entre las condiciones particulares de manejo y el ambiente en que éste es ejecutado, alcanzar los niveles máximos o mínimos de t/ATD puede tener diversas implicancias desde el punto de vista de la sustentabilidad. Así, cuando el cociente t/ATD se aproxime a los menores valores encontrados en este estudio (50%), se incrementan las posibilidades de un aumento del nivel de la napa, la cual podría contener sales disueltas y salinizar la rizósfera (Jobbagg et al., 2008). Si esto ocurriera, una posible solución consistiría en mantener un valor bajo de t/ATD (paradójicamente, la misma condición que originó el problema), pero en este caso procurando que el excedente hídrico ocurra cuando la napa está en su mínimo nivel, permitiendo que las sales sean lavadas por percolación y restituidas a los estratos en que se encontraban originalmente. Entonces, a la luz de los resultados encontrados, estos impactos podrían regularse si se guiara el manejo en función del mes de cosecha y la longitud del ciclo de cultivo, por ejemplo. No obstante, antes de llevar a la práctica estos resultados sería prudente profundizar en el estudio del efecto de estas y otras variables predictoras, considerando además escalas temporales más detalladas (por ejemplo, coincidentes con los momentos en que la necesidad de irrigación es máxima o bien con la época lluviosa). Desde otro punto de vista, dado que la contaminación de napas y ríos con pesticidas y nutrientes depende de la percolación (Southwick et al., 1992; Verburg et al., 1998; Paraíba et al., 2008), la ocurrencia de niveles de t/ATD elevados minimiza la presencia de agua líquida en el sistema y, con esto, las probabilidades de contaminación. Algo similar ocurriría con las partículas de suelo que se erosionan por efecto de la escorrentía superficial y luego son descargadas en cursos de agua (Whitehead et al., 2009), condición que también se ve facilitada por mayores porcentajes de t/ATD .

Por último, resta mencionar el impacto potencial del cambio de la cobertura vegetal sobre el sistema Tierra-atmósfera (C), con efectos sobre las condiciones meteorológicas y climáticas que pueden repercutir a escalas local, regional e incluso global (Shukla y Mintz, 1982; Pielke et al., 1999; Bounoua et al., 2002). Los principales controles que modulan este efecto están relacionados con el balance de energía de la superficie resultante en cada una de las coberturas y son, por un lado, el albedo y, por el otro, la partición de energía entre los flujos de calor latente y sensible, dependiente de la cantidad de agua perdida desde la superficie (evapotranspiración) (Bounoua et al., 2002; Chapin et al., 2002). El caso estudiado en esta tesis (donde un ecosistema agrícola reemplaza a un ecosistema selvático, las yungas) involucra profundos cambios de estructura y funcionamiento, los cuales pueden repercutir sobre los controles presentados y, finalmente, sobre el clima. En este sentido, el agua utilizada por los cañaverales superó a la correspondiente a las yungas en un rango que va del 26,8% al 230% (de acuerdo con los valores y supuestos presentados en este capítulo). Considerando relativamente constantes a las entradas de energía (i.e., radiación de onda corta y radiación de onda larga emitida por la atmósfera), los incrementos porcentuales de las pérdidas de agua aumentan el flujo de calor latente a expensas de un menor flujo de calor sensible, tal como fue observado por Haddeland et al. (2006) en las cuencas de los ríos Colorado y Mekong. De esta manera, el agua extra utilizada por el cultivo en comparación con las yungas (1,93 a 9,35 $\text{Ml ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), estaría extrayendo de la superficie el calor requerido para evaporar dicho volumen: 15 a 72,6 W m^{-2} , respectivamente, equivalente al 15 y 74% de la radiación de onda corta incidente. En línea con los resultados de Haddeland et al. (2006), esta sustracción de calor provocaría un enfriamiento de la superficie terrestre y de los estratos de aire vecinos. Pero, además, las salidas de agua en estado gaseoso desde un ecosistema pueden ocasionar otros efectos sobre las condiciones meteorológicas y el clima. Por un lado, el aumento de la humedad del aire, ya sea que el agua se encuentre en estado gaseoso o líquido, modifica las propiedades ópticas de la atmósfera, alterando los patrones de reflexión, refracción, difracción y/o absorción de las ondas electromagnéticas (Campbell y Norman, 1998). Esto podría interferir sobre el flujo de la radiación solar y las pérdidas de radiación de onda larga de la superficie, alterando el balance de energía superficial y estableciendo un nuevo punto de equilibrio. Por otro lado, cuando el vapor de agua liberado por el cultivo se condensa durante el proceso de formación de nubes se libera una determinada cantidad de calor a la atmósfera (Chapin et al., 2002). Como consecuencia, aumentan la temperatura de la atmósfera y la radiación de onda larga que ésta emite, lo que se traduce en mayores entradas de energía en la superficie terrestre, lo cual también redundaría en un nuevo punto de equilibrio del balance de energía superficial. La interacción entre los efectos presentados, que deberían considerarse simultáneamente a múltiples escalas temporales y espaciales, implica una complejidad tal que su estudio sólo puede ser abordado utilizando modelos que integren conceptos hidrológicos, atmosféricos y ecológicos (Shukla y Mintz, 1982; Pielke et al., 1999). Por lo tanto, las ideas expuestas en este párrafo deben ser complementadas con este tipo de aproximaciones.

5.5. CONCLUSIONES

El cultivo de caña de azúcar en el NOA provoca grandes alteraciones sobre las dinámicas del agua y de la energía de los ecosistemas regionales. A modo de ejemplo, los requerimientos hídricos del cultivo de caña estuvieron entre 913 y 1655 mm año^{-1} .

Estos valores indican que las salidas de agua pueden ser hasta un 100% mayor si se las compara con los requerimientos de las yungas, o bien con la precipitación media (ambos cercanos a los 800 mm anuales). Desde el punto de vista de la energía, el incremento de los requerimientos hídricos de la caña en comparación con las yungas implica que por efecto de la evaporación del agua se pierden entre 15 y 72,6 w m^{-2} (i.e., del 15,5 al 74,3% de la radiación de onda corta incidente, respectivamente). Por otro lado, considerando los requerimientos hídricos del cultivo y al caudal promedio del río San Francisco, la superficie máxima que podría cultivarse bajo riego sería de entre un 2,4 y un 65 % del total de la cuenca de dicho río (dependiendo de la eficiencia de irrigación). En cuanto a las salidas de agua del agroecosistema, la proporción del *ATD* que se pierde en forma gaseosa (cociente t/ATD) tomó valores de entre 88 y 48,5% cuando el *ATD* estuvo en el rango de los 1000 y 3000 mm ciclo^{-1} , respectivamente.

De acuerdo con la bibliografía específica, estas alteraciones representan múltiples amenazas para la sustentabilidad de los ecosistemas de la región, las cuales podrían ocasionar distintos impactos ambientales dependiendo del contexto en el que ocurran. Frente a esta posibilidad, se debe disponer de información sobre los controles que modulan la magnitud de dichas alteraciones. En este sentido, de las diferentes variables predictoras estudiadas en esta tesis, el genotipo influyó sobre todos los índices considerados (*EUA*, *EUR*, *t* y t/ATD). Otra variable de importancia fue la frecuencia de riego invernal, ya que estuvo inversamente relacionada con los niveles máximos de *EUA* y *EUR* alcanzables, y directamente relacionada con la transpiración del cultivo. La edad del cañaveral presentó un efecto negativo sobre ambas eficiencias a partir del estadio soca 4 (5 años de edad). Por último, el año de zafra es una variable que también influyó sobre varios índices, aunque no se pudo identificar cuál o cuáles fueron las variables que estaban enmascaradas detrás de este factor.

Capítulo 6

Consideraciones finales

Esta tesis tuvo el objetivo general de estudiar las dinámicas del agua y de la radiación en cultivos de caña de azúcar del NO Argentino. Para poder abordar este análisis se calibró una metodología para la estimación de la transpiración del cultivo (Capítulo 2), la cual mostró un muy buen desempeño en comparación con otras técnicas alternativas (Figuras 2.3 y 2.4). Esto representa un avance metodológico importante ya que no se disponía de otras herramientas desarrolladas en las condiciones ecológicas locales y para el cultivo de caña. Además, la técnica parametrizada tiene la particularidad de estar basada en información satelital (sumada a datos de campo), lo que facilita que el estudio se aplique en grandes áreas y sea replicable. En función de esta metodología se encontró una transpiración promedio de 1204 mm ciclo-1, con mínimos y máximos absolutos de 870 y 1970 mm ciclo-1, respectivamente. Estos valores resultaron comparables con los rangos citados en la bibliografía internacional (Inman-Bamber y McGlinchey, 2003; Singh et al., 2007; Carr y Knox, 2011) y, por otro lado, superaron en todos los casos a la precipitación media anual de la región (800 mm año-1). Se encontró además que, entre un total de 8 prácticas culturales, aquellas con mayor repercusión sobre el consumo de agua del cañaveral son la longitud del ciclo de cultivo y el mes en que se inicia dicho ciclo (Figuras 3.2 y 3.3). También se establecieron combinaciones de prácticas culturales que conducen a niveles contrastantes de transpiración (Figura 3.1). Esta información permite planificar el manejo del cultivo con el objetivo de regular el consumo de agua, tanto a escala de establecimiento como regional.

Cuando se cuantificaron ambas *EUA* y *EUR* (Figuras 4.1 y 4.8) se obtuvieron valores que abarcan todo el rango de variabilidad documentado en la bibliografía internacional, representativos de condiciones agroecológicas altamente contrastantes. Esto significa que si bien las eficiencias son muy bajas en algunos escenarios culturales, a través del manejo del cultivo se podría aumentar las mismas y, en algunos casos, llegar a los niveles máximos observados en caña de azúcar. Como complemento de este hallazgo, y potenciándolo, se encontró un claro efecto de algunas prácticas culturales tanto sobre la *EUA* como de la *EUR* (Figuras 4.2 y 4.9), lo que permite establecer estrategias de manejo para manipular dichas eficiencias. Así, se contribuyó al conocimiento del funcionamiento del cultivo de caña de azúcar en el NO de la Argentina, donde el estudio de ambas *EUA* y *EUR* era prácticamente nulo, y por otro lado se profundizaron y contrastaron los antecedentes existentes a nivel internacional.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad de la cañicultura se encontró que la transpiración del cultivo supera en valores que pueden ser de hasta un 100% a la precipitación y a los requerimientos de las yungas, lo que se traduce en potenciales impactos ambientales. Así, como la transpiración transfiere vapor de agua hacia la atmósfera (uno de los gases con mayor efecto invernadero), esto puede tener repercusiones sobre el clima y las condiciones meteorológicas, con consecuencias a nivel regional e incluso global. Las alteraciones sobre el balance de agua también pueden repercutir sobre la regulación de inundaciones, las napas freáticas y la salinización de los suelos, entre otros. La máxima superficie cultivable (calculada en función de las necesidades hídricas y el caudal apropiado del río San Francisco) presentó un rango de variabilidad notablemente amplio. Esto advierte sobre el riesgo de que fácilmente podría superarse el límite inferior de dicho rango, comprometiéndose a los distintos bienes y servicios que dependen del río San Francisco. Este riesgo debería afrontarse con la realización de monitoreos frecuentes de las condiciones meteorológicas, junto con el comportamiento del cultivo, y del caudal del río, de manera que se pueda realizar un diagnóstico temprano. Además, los resultados hallados en esta

tesis permiten planificar el manejo de manera de adecuar los requerimientos hídricos del cultivo a la disponibilidad de agua pronosticada.

Los resultados encontrados en esta tesis constituyen un punto de partida para proponer nuevos objetivos de estudio, los cuales podrían incrementar el conocimiento de la cañicultura en el NOA, y promover la consolidación de la actividad de acuerdo con criterios de sustentabilidad. En relación con el genotipo (factor para el que, además, Ferraro et al. (2009) demostraron que es uno de los principales controles del rendimiento del cultivo), debería caracterizarse el comportamiento de las variedades más difundidas en la región contemplando, idealmente, su interacción con otras variables. Este punto sería de gran importancia ya que los resultados indican que afecta a todos los índices estudiados (*EUA*, *EUR*, *t* y *t/ATD*). Respecto al patrón observado para el riego invernal, fue llamativo que las menores frecuencias de riego se asociaron tanto a las eficiencias más altas como a las más bajas. Entonces, se deberían iniciar nuevos estudios para identificar aquellos factores que permiten alcanzar eficiencias medias a altas cuando se reduce la irrigación invernal. Otra variable importante fue el año de zafra. Como no se pudo identificar los factores que enmascarados detrás de su efecto (lo que reduce la previsibilidad del comportamiento del cultivo), convendría profundizar el análisis para dilucidar este efecto, tomando medidas precautorias hasta que se disponga de mayor información. Por otro lado, sería ventajoso generar estudios que permitan identificar las prácticas más oportunas para determinado ambiente y/o época del año y, sobre esta base, planificar un ordenamiento territorial para la cañicultura en la región.

Bibliografia

- Allen, RG. 1995. Evaluation of procedures for estimating grass reference evapotranspiration using air temperature data only. Report prepared for FAO, Water Resources Development and Management Service, FAO, Rome, Italy.
- Allen, RG, Pereira, LS, Raes, D, y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy.
- Allison, BE, Fechter, J, Leucht, A, y Sivakumar, MVK. 1993. The use of the CERES-MILLET model for production strategy analysis in south west Niger. 15th Congress on Irrigation and Drainage. 2nd Workshop on Crop Water Models. The Hague, the Netherlands 1993. Session III. p. 17.
- Asner, GP, Nepstad, D, Cardinot, G, y Ray, D. 2004. Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. *Proceedings of National Academy of Sciences USA* 101: 6039-6044.
- Asocaña. 2010. Precio promedio mensual internacional de azúcar crudo y blanco primera posición. Disponible en: www.asocana.org
- Ball-Coelho, B, Sampaio, EVSB, Tiessen, H, Stewart, JWB, 1992. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. *Plant Soil* 142: 297-305.
- Barbieri, V, y Villa Nova, NA. 1977. Climatologia e cana-de-acucar. Araras: Planalsucar - Coordenadoria Regional Sul. 22p.
- Baret, F, y Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote sensing of environment* 35:161-73.
- Bastiaanssen, W, Menenti, M, Feddes, RA, y Holtslag, AAM. 1998. A Remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): I. formulation. *Journal of Hydrology* 212-213 (1-4): 198-212.
- Bastiaanssen, WGM, Ahmad, MD, y Tahir, Z. 2003. Upscaling water productivity in irrigated agriculture using remote sensing and GIS technologies. In Kijne, Barker y Molden (eds.), *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*, CABI Publishing, no. 1, Wallingford, Chapter18: 289-300.
- Bausch, WC, y Neale, CU. 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* 30(3): 703-709.
- Bausch, WC, y Neale, CU. 1989. Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering* 32(6): 1901-1908.
- Bausch, WC. 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agricultural Water Management* 27: 55-68.
- Bell, MJ, Halpin, NV, Orange, DN, y Haines, M. 2001. Effect of compaction and trash blanketing on rainfall infiltration in sugarcane soils. *Proceedings of the Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, Mackay, Queensland, Australia.

- Blanco-Canqui, H, y Lal, R. 2009. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical reviews in plant sciences* 28 (3): 139-163.
- Bosch, JM, y Hewlett, JD. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3-23.
- Bounoua, L, Defries, R, Collatz, GJ, Sellers, P, y Khan, H. 2002. Effects of land cover conversion on surface climate. *Climatic change* 52: 29-64.
- Breiman, L, Friedman, J, Olshen, R, y Stone, C. 1984. *Classification and Regression Trees*. Wadsworth International Group, Belmont, California, USA.
- Brito, E, Giardina, J, Romero, E, Dignonzelli, P, Alonso, J, Casen, S, y Alonso, L. 2005. Recomendaciones generales para la implantación del cañaveral. *Gacetilla Agroindustrial de la EEAOC* 65 Bis.
- Brown, A, Pacheco, S, Cristobal, L, Lomáscolo, T, y Malizia, L. 2006. Situación ambiental Depto. San Martín y sus implicancias en los hechos ocurridos durante la estación lluviosa 2005-2006. Fundación ProYungas y Proyecto Alto Bermejo, 28 páginas. <http://www.proyungas.org.ar/informes/pdf/informedeptosanmartin2006.pdf>
- Bull, T. 2000. The sugarcane plant. En *Manual of cane growing*, Hogarth y Allsopp (Eds.), Bureau of sugar experimental stations, Indooroopilly, Australia. Pp 71-83.
- Cade, BS, y Noon, BR. 2003. A gentle introduction to quantile regression for ecologists. *Frontiers in ecology and the environment* 1: 412-420.
- Cadet, P, Spaull, V, y McArthur, DG. 2002. Role of plant parasitic nematodes and abiotic soil factors in growth heterogeneity of sugarcane on a sandy soil in South Africa. *Plant and soil* 246: 259-271.
- Calera Belmonte, A, Jochum, AM, y Cuesta García, A. 2003. Space-assisted irrigation management: towards user-friendly products. *ICID Int. Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions*, Montpellier, France.
- Calera Belmonte, A, Jochum, A, Cuesta García, A, Montoro, A, López, P. 2005. Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 337-353.
- Campbell, GS, y Norman, JM. 1998. *An introduction to environmental biophysics*, 2nd ed. Springer-Verlag New York, Inc. 286 páginas.
- Cárcova, J, y Otegui, ME. 1997. Disponibilidad hídrica para el cultivo de maíz a lo largo del ciclo en argiúdoles típicos de Pergamino y Balcarce. VI Congreso Nacional de Maíz. Pergamino, 13-15 de noviembre. II: 180-185.
- Carr, MK, y Knox, JW. 2011. The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*Saccharum officinarum*): a review. *Experimental agriculture* 47 (1): 1-25.
- Chabot, R., Bouarfa, S., Zimmer, D., Chaumont, C. and Duprez, C., 2002. Sugarcane transpiration with shallow water-table: sap flow measurements and modelling. *Agricultural Water Management* 54 (1): 17-36.
- Chapin, FS III, Torn, MS, y Tatenos, M. 1996. Principles of ecosystem sustainability. *American naturalist* 148 (6): 1016-1037.

- Chapin, FS III, Matson, PA, y Mooney, HA. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer-Verlag New York, Inc., New York, USA.
- Cheesman, OD. 2004. Environmental impacts of sugar production. The cultivation and processing of sugarcane and sugar beet. CABI Publishing, Wallingford, Oxfordshire, UK.
- Choudhury, BJ, Ahmed, NU, Idso, SB, Reginato, RJ, y Daughtry, CS. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment* 50: 1-17.
- Cuesta, A, Montoro, A, Jochum, AM, López, P, y Calera Belmonte, A. 2005. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *Información Técnica Económica Agraria (AIDA)*, 101 (3): 212-224.
- Cuenya, MI, Chavanne, ER, Ostengo, S, Espinoza, M, Ahmed, M, Costilla, D, Armanini, A, y García, M. 2005. Distribución de las variedades comerciales de caña de azúcar en el área de cultivo de la Provincia de Tucumán: campaña 2004-2005. *Gacetilla Agroindustrial de la EEAOC*, 65.
- da Silva, TGF. 2009. Análise de crescimento, interacao biosfera-atmosfera e eficiencia do uso de agua da cana-de-acúcar irrigada no submédio do vale do sao francisco. *Dissertação de Doctor Scientiae*. Universidad Federal de Vicosa, Brasil. 194 pp.
- Dardanelli, J, Collino, D, Otegui, ME, y Sadras, V. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En Satorre, Benech-Arnold, Slafer, de la Fuente, Miralles, Otegui y Savin (eds.). *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina. Pp: 375-406.
- de Aguiar, DA. 2007. Monitoramento da área colhida de cana-de-acúcar por meio de imagens do sensor MODIS. *Dissertação de Mestrado*. São José dos Campos, Sao Paulo, Brasil. 103 pp. http://www.rbc.ufrj.br/_pdf_60_2008/60_04_7.pdf
- Denmead, O, Mayocchi, C, y Dunin, F. 1997. Does green cane harvesting conserve soil water? In: *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists* 19: 139-146.
- Dolan, BJ, y Parker, GR. 2005. Ecosystem classification in a flat, highly fragmented region of Indiana, USA. *Forest ecology and management* 219:109-131.
- Donaldson, RA, Redshaw, KA, Rhodes, R, y van Antwerpen, R. 2008. Season effectis of some comercial south african sugarcane cultivars, I: biomass and radiation use efficiency. *Proceedings of the south african sugar technology association* 81: 517-527.
- Donladson, RA. 2009. Season effects on the potential biomass and sucrose accumulation of some commercial cultivars of sugarcane. *Doctoral thesis in Crop Science*. Faculty of Science and Agriculture, University of KwaZulu-Natal, South Africa. <http://library.ukzn.ac.za/Sciences-Agriculture/Agriculture.aspx>
- Doorenbos, J, y Pruitt, WO. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24, Rome, Italy. 152 p.
- Doorenbos, J, y Kassam, AH, Bentvelsen, CLM, Branscheid, V, y Plusje, JMGA. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 33. Rome, Italy. 200 p.

- Duchemin, B, Hadria, R, Erraki, S, Boulet, G, Maisongrande, P, Chehbouni, A, Escadafal, R, Ezzahar, J, Hoedjes, JCB, Kharrou, MH, Khabba, S, Mougenot, B, Olioso, A, Rodriguez, JC, y Simmoneaux, V. 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management* 79: 1-27.
- Dzeroski, S, y Drumm, D. 2003. Using regression trees to identify the habitat preference of the sea cucumber (*Holothuria leucospilota*) on Rarotonga, Cook Islands. *Ecological modelling* 170: 219–226.
- Etter, A, McAlpine, C, Wilson, K, Phinn, S, y Possingham, H. 2006. Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture ecosystems & environment* 114: 369-386.
- Evans, H. 1935. The root system of the sugarcane: I. Methods of study. *Empire Journal of Experimental Agriculture* 3: 351-363.
- Evett, SR, Howell, TA, y Schneider, AD. 1995. Energy and water balances for surface and subsurface drip irrigated corn. pp. 135-140. *Proceedings of the 5th Microirrigation international congress*. American Society of Agricultural Engineers, Michigan, USA.
- Ferraro, DO. 2008. Evaluación exergética de la producción de etanol en base a grano de maíz: un caso de estudio en la Región Pampeana (Argentina). *Ecologia austral* 18: 323-336.
- Ferraro, DO, Rivero, DE, y Ghersa, CM. 2009. An analysis of the factors that influence sugarcane yield in Northern Argentina using classification and regression trees. *Field crops research* 112: 149-157.
- Ferreira Junior, RA, Souza, JL, de Teodoro, I, dos Santos, MA, Almeida, ACS, dos Santos, MJ, y Porfirio, ACS. 2008. Índice de área foliar, radiación interceptada e eficiencia do uso da radiación em variedades de cana-de-acúcar. *Congresso nacional da sociedade dos técnicos acucareiros e alcooleiros*. Maceio, Brasil. P 728-733.
- Fida Hasan, H, Alam, MR, Jabber, MA, Begum, MK, y Miah, MAS. 2003. Effects of water-logging on juice quality and yield of sugarcane. *Pakistan journal of biological sciences* 6 (13): 1151-1155.
- Figueroa, LR, Romero, ER, y Fadda, GS. 2009. El riego de la caña de azúcar - Capítulo 8. En Romero, Digonzelli y Scandaliari. *Manual del cañero*. Las Talitas: Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, Argentina.
- Gallo, KP, Daughtry, CST, y Bauer, ME. 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Remote sensing of environment* 17: 221-232.
- Garatuza-Payán, J, Shuttleworth, WJ, Encinas, D, Mc Neil, DD, Stewart, JB, deBruin, H, y Watts, CJ. 1998. Measurement and modelling evaporation for irrigated crops in northwest Mexico. *Hydrological processes* 12: 1397-1418.
- Garatuza-Payán, J, y Tamayo, A, Watts, C, y Rodriguez, JC. 2003. Estimating large area wheat evapotranspiration from remote sensing data. *Proceedings of the International geosciences and remote sensing symposium*, Toulouse, France. pp 380-382.

- Ghersa, CM, Ferraro, DO, y Rivero, DE. 2006. Diagnóstico de la sustentabilidad ecológica y productiva en los sistemas de producción de caña de azúcar. Convenio de Asistencia y cooperación IFEVA - LedesmaSAAI, 1ra etapa. 33p.
- Ghersa, CM, Ferraro, DO, y Rivero, DE. 2007. Diagnóstico de la sustentabilidad ecológica y productiva en los sistemas de producción de caña de azúcar. Ampliación del Convenio de Asistencia y cooperación IFEVA - LedesmaSAAI, Informe 3. 46 p.
- Gleik, PH. 2000. *The world's water 2000-2001*. Island Press, Washington DC, USA.
- Gonzalez-Piqueras, J, Calera Belmonte, A, y Gilabert, MA. 2003. Estimation of crop coefficients by means of optimized vegetation indices for corn. *Proceedings of the SPIE Remote Sensing Europe Symposium, Barcelona*, pp.110-118.
- González-Piqueras, J. 2007. Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección. Extensión a escala regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia. Valencia, España.
- Gosnell, JM. 1973. Some factors affecting flowering in sugar cane. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 47: 144-147.
- Grigera, G, Oesterheld, M, y Pacin, F. 2007. Monitoring forage production for farmers' decision making. *Agricultural systems* 94 (3): 637-648.
- Guerschman, JP, Van Dijk, A, Mattersdorf, G, Beringer, J, Hutley, LB, Leuning, R, Pipunic, RC, y Sherman, BS. 2009. Scaling of potential evapotranspiration with MODIS data reproduces flux observations and catchment water balance observations across Australia. *Journal of hydrology* 369: 107-119.
- Gunston, H, y Batchelor, CH. 1983. A comparison of the Priestley-Taylor and Penman methods for estimating reference crop evapotranspiration in tropical countries. *Agricultural Water Management* 6: 65-77.
- Guo, H, Hu, Q, y Jiang, T. 2008. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake Basin, China. *Journal of hydrology* 355: 106-122.
- Gupta, R, and Yadav, RL. 1995. Contribution of groundwater to evapotranspiration of sugarcane during summer. *Indian sugar* 4: 887-890.
- Haddeland, I, Lettenmaier, DP, y Skaugen, T. 2006. Effect of irrigation on the water and energy balances of the Colorado and Mekong river basins. *Journal of hydrology* 324: 210-223.
- Heilman, JL, Heilman, WE, y Moore, DG. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal* 74: 967-971.
- Hoekstra, AY, y Chapagain, AK. 2007. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management* 21 (1): 35-48.
- Humbert, HP. 1968. *The growing of sugarcane*. Elsevier, Amsterdam. 779 pp.
- Hunsaker, DJ, Pinter, PJ, Barnes, EM, y Kimball, BA. 2003. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrigation science* 22(2): 95-104.

- Hurst, C.A., Thorburn, P.J., Lockington, D. and Bristow, K.L., 2004. Sugarcane water use from shallow water tables: implications for improving irrigation water use efficiency. *Agricultural Water Management* 65: 1-19.
- Idso, SB, Schmugge, TJ, Jackson, RD, y Reginato, RJ. 1975. The utility of surface temperature measurements for remote sensing of soil water studies. *Journal of Geophysical Research* 80 (21): 3044-3049.
- Inman-Bamber, NG, Singels, A, y Muchow, RC. 1998. A systems approach to benchmarking for sugarcane production in Australia and South Africa. *Proceedings of the South African Sugar Technologists Association* 72: 3-9.
- Inman-Bamber, NG, y McGlinchey, MG. 2003. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. *Field Crops Research* 83: 125-138.
- Inman-Bamber, NG, y Smith, DM. 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research* 92 (2): 185-202.
- Jackson, RD, Reginato, RJ, y Idso, SB. 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research* 13: 651-656.
- Jackson, RB, Carpenter, SR, Dahm, CN, McKnight, DM, Naiman, RJ, Postel, SL, y Running, SW. 2001. Water in a changing world. *Ecological applications* 11(4): 1027-1045.
- Jalota, SK, y Arora, VK. 2002. Model-based assessment of water balance components under different cropping systems in north-west India. *Agricultural Water Management* 57: 75-871.
- James, G. 2004. *Sugarcane* (2nd Edition). Oxford: Blackwell Publishing.
- Jerez, EF, Mariotti Martinez, JA, y Mariotti, JA. 2002. Nueva distribución de variedades de caña de azúcar en la Provincia de Tucumán: campaña 2001-2002. *Avance Agroind.* 23 (4): 16-19.
- Jobbagy, EG, Noretto, MD, Santoni, CS, y Baldi, G. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología austral* 18: 305-322.
- Keating, BA, Robertson, MJ, Muchow, RC, y Huth, NI. 1999. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. *Field crops research* 61: 253-271.
- Keating, BA, Carberry, PS, Bindraban, PS, Asseng, S, Meinke, H, y Dixon, J. 2010. Eco-efficient agriculture: Concepts, Challenges and Opportunities. *Crop science* 50: S-109-S-119.
- Khaledian, MR, Mailhol, JC, Ruelle, P, y Rosique, P. 2009. Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seedings system: The case of corn and durum wheat in a Mediterranean context. *Agricultural water management* 96: 757-770.
- Kite, BW, y Droogers, P. 2000. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data: A case study from western Turkey. *Journal of Hydrology* 209: 3-18.
- Kutilek, M, y Neilsen, DR. 1994. *Soil Hydrology*. Catena-Verlag, Reiskirchen (Germany). 370 pp.

- Lecler, NL, Mills, DC, y Smithers, JC. 2008. Automated short-furrow irrigation. *Proceedings of the South African Sugar Technologists Association* 81: 470-473.
- Lisson, SN, InmBmbr, NG, Robertson, MJ, y Keating, BA. 2005. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Field crops research* 92: 321-335.
- Longfield, SA, y Macklin, MG. 1999. The influence of recent environmental change on flooding and sediment fluxes in the Yorkshire Ouse basin. *Hydrological processes* 13: 1051-1066.
- Lopez-Urrea, R, de Santa Olalla, MF, Montoro, A, y Lopez-Fuster, P. 2009. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management* 96: 1031-1036.
- Los, SO, Collatz, GJ, Sellers, PJ, Malmstrom, CM, Pollack, NH, De Fries, RS, Bounoua, L, Parris, MT, Tucker, CJ, y Dazlich, DA. 2000. A Global 9-Yr Biophysical Land Surface Dataset from NOAA AVHRR Data. *Journal of hydrometeorology* 1: 183:199.
- Magarey, RC. 1996. Microbiological aspects of sugarcane yield cane. *Australian journal of agricultural research* 47: 307-322.
- Magarey, RC, Bull, JI, Blair, BL, y Johnson, EJ. 1997. Biological studies of soils in paired old and new land sites growing sugarcane. *Australian journal of experimental agriculture* 37: 451-457.
- Mailhol, JC, Olufayo, AA, y Ruelle, P. 1997. Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. *Agricultural water management* 35: 167-182.
- McCree, Kj. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural meteorology* 10: 442-453.
- Mekkonen, GM, y Bastiaanssen, WM. 2000. A new simple method to determine crop coefficients for water allocation planning from satellites: results from Kenya. *Irrigation and drainage systems* 14: 237-256.
- Menenti, M. 2000. Evaporation. En: Schultz GA, Engman ET (eds.). *Remote sensing in hydrology and water management*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, p 157-188.
- Meyer, W. 1997. The irrigation experience in Australia — lessons for the sugar industry. En: Keating, BA, Wilson, JR (Eds.), *Intensive Sugarcane Production: Meeting the Challenges Beyond 2000*. CAB International, Wallingford, pp. 437-454.
- Muchow, RC, Spillman, MF, Wood, AW, y Thomas, MR. 1994. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigation tropical conditions. *Australian journal of agricultural research* 45(1): 37-49.
- Muchow, RC, Evensen, CI, Osgood, RV, y Robertson, MJ. 1997. Yield accumulation in irrigated sugarcane: II. Utilization of intercepted radiation. *Agronomy Journal* 89: 646-652.
- Muchow, RC, y Keating, BA. 1998. Assessing irrigation requirements in the Ord Sugar Industry using a simulation modelling approach. *Australian journal of experimental agriculture* 38 (4): 345-354.

- Norman, JM, Anderson, MC, Kustas, WP, French, AN, Mecikalski, J, Torn, R, Diak, GR, y Achmugge, TJ. 2003 Remote Sensing of Evapotranspiration for Precision-Farming Applications. Proceedings of the International geosciences and remote sensing symposium, Toulouse, France. Pp 21-25.
- Novak, V. 1981. The structure of evapotranspiration: I and II. (In Slovak). Vodohosp. Cas. (Journal of water management) 35: 3-21.
- Obreza, TA, Anderson, DL, and Pitts, DJ. 1998. Water and nitrogen management of sugarcane on sandy, high water-table soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:992-999.
- Olivier, F, y Singels, A. 2003. Water use efficiency of irrigated sugarcane as affected by row spacing and variety. Proceeding of South African Sugar Technology Association 7: 347-351.
- Ostengo, S, Espinosa, MA, García, MB, Delgado, N, y Cuenya, MI. 2011. Distribución varietal del cultivo de la caña de azúcar y aplicación de otras tecnologías en la Provincia de Tucumán. Relevamiento de la campaña 2010/2011. Gacetilla agroindustrial de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes 76. 15 pp.
- Pankhurst, CE, Magarey, RC, Stirling, GR, Blair, BL, Bell, MJ, y Garside, AL. 2003. Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. Soil & tillage research 72: 125-137.
- Pankhurst, CE, Blair, BL, Magarey, RC, Stirling, GR, y Garside, AL. 2005. Effects of biocides and rotation breaks on soil organisms associated with the poor early growth of sugarcane in continuous monoculture. Plant and soil 268: 255-269.
- Paraíba, LC, Kataguirí, K, Cerdeira, AL, Queiroz, SCN, y Ferracini, VL. 2008. Sugarcane herbicide leaching risk evaluation in Guarany aquifer. XV Congresso brasileiro de águas subterrâneas, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. 6 páginas.
- Park, SE, Robertson, M, y Inman-Bamber, NG. 2005. Decline in the growth of a sugarcane crop with age under high input conditions. Field Crops Research 92: 305-320.
- Patzek, TW, y Pimentel, D. 2005. Thermodynamics of energy production from biomass. Critical reviews in plant sciences 24 (5-6): 327-364.
- Picoli, MCA. 2006. Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso Usina Catanduva. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, Sao Paulo, Brasil. 90pp.
- Pielke, RA, Liston, GE, Lu, L, y Avissar, R. 1999. Land-surface influences on atmospheric dynamics and precipitation. En Tenhunen, JD, y Kabat, P, (editors) "Integrating hydrology, ecosystem dynamics, and biogeochemistry in complex landscapes" - Dahlem Workshop report, Berlin, Germany. Willey, Chichester, England.
- Pimentel, D, Hurd, LE, Belotti, AC, Forster, MJ, Oka, IN, Sholes, OD, y Whitman, RJ. 1973. Food Production and the Energy Crisis. Science 182: 443-449.

- Pimentel, D, y Patzek, T. 2005. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Natural resources research* 14 (1): 65-76.
- Pimentel, D, Patzek, T, y Gerald, C. 2007. Ethanol production: energy, economic, and environmental losses. *Reviews of environmental contamination and toxicology* 189: 25-41.
- Ponting, C. 2000. *World History: A New Perspective*. London: Chatto & Windus. 923 páginas.
- Postel, SL. 2000. Entering an era of water scarcity: the challenges ahead. *Ecological Applications* 10: 941-948.
- Potter, CS, Randerson, JT, Field, CB, Matson, PA, Vitousek, PM, Mooney, HA, y Klooster, SA. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global geochemistry cycles* 7: 811-841.
- Priestley, CHB, y Taylor, RJ. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review* 100: 81-92.
- Quershi, SA, Madramootoo, CA, y Doods, GT. 2002. Evaluation of irrigation schemes for sugarcane in Sindh, Pakistan, using SWAP93. *Agricultural water management* 54: 37-48.
- Ramesh, P, y Mahadevaswamy, M. 1999. Water requirement and water use efficiency of sugarcane varieties as influenced by drought during formative phase. *Indian sugar* 49 (6): 405-409.
- Rana, G, Losavio, N, Mastrorilli, M, y Scarascia, MEV. 1990. Crop evapotranspiration measured by two energy balance methods under Mediterranean climate. *Acta Horticolae* 278: 517-524.
- Rana, G, y Katerji, N. 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy* 13:125-153.
- Robertson, MJ, y Muchow, RC. 1994. Future research challenges for efficient crop water use in sugarcane production. *Proceedings of the Australian society of sugarcane technologists* 16: 193-200.
- Robertson, MJ, Wood, AW, y Muchow, RC. 1996. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. *Field Crops Research* 48: 11-25.
- Robertson, MJ, Inman-Bamber, NG, y Muchow, RC. 1997. Opportunities for improving the use of limited water by the sugarcane crop. In: Keating, BA, Wilson, JR (Eds.), *Intensive Sugarcane Production: Meeting the Challenges Beyond 2000*. CAB International, Wallingford, pp. 287-304.
- Robertson, MJ, Inman-Bamber, NG, Muchow, RC, y Wood, AW. 1999. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. *Field Crops Research* 64: 211-227.
- Rocha, J, Perdigao, A, Melo, R, y Henriques, C. 2012. Remote sensing based crop coefficients for water management in agriculture. In: Kurcovic, S (Ed.), *Sustainable*

- Development - Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management. InTech, New York, pp. 167-192.
- Romero, ER, Scandaliaris, J, Tonatto, J, Leggio Neme, MF, y Alonso, L. 2006. Efectos de los principales factores de manejo de la plantación en la emergencia de caña planta en Tucumán, Argentina. *Revista industrial y agrícola de Tucumán* 83 (1-2): 19-28.
- Romero, ER, Digonzelli, PA, y Scandaliari, J. 2009 Manual del cañero. Las Talitas: Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, Argentina. <http://www.eeaoc.org.ar/publicaciones/categoria/18/50/Manual-del-Canero.html>
- Romero, RR, Scandalaris, J, Digonzelli, PA, Alonso, LG, Leggio, F, Giardina, JA, Casen, SD, Tonatto, MJ, y de Ulivarri, JF. 2009. Effect of variety and cane yield on sugarcane potential trash. *Revista industrial y agrícola de Tucumán* 86 (1): 9-13.
- Romero, ER, Tonatto, J, Scandaliaris, J, Digonzelli, P, y Leggio Neme, MF. 2010. Efectos de la temperatura en la emergencia y el crecimiento inicial de caña planta y primera soca, variedad TUCCP 77-42. *Revista industrial. y agrícola de Tucumán* 87 (1): 7-14.
- Ruiz Palacios, JD, Rhiner, RE, Guzman, GH, y Ulloa, RA. 1982. Convenio sobre distribución cupos de agua río Bermejo. Resistencia, Chaco, Argentina.
- SAGPyA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, actualmente Ministerio de Agricultura). 2003. Informe de productos regionales: azúcar.
- Scanlon, BR, Reedy, RC, Stonestrom, DA, Prudic, DE, y Dennehy, KF. 2005. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global change biology* 11: 1577-1593.
- Seckler, D, Amarasinghe, U, Molden, D, de Silva, R, y Barker, R. 1998. World water demand and supply, 1990 to 2025: scenarios and issues. Research report 19, international water management institute, Colombo, Sri Lanka.
- Sellers, PJ, Berry, JA, Collatz, GJ, Field, CB, y Hall, FG. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote sensing of environment* 42: 187-216.
- Sepaskhah, AR, y Ilampour, S. 1995. Effects of soil moisture stress on evapotranspiration partitioning. *Agricultural water management* 28: 311-323.
- Sharpe, P. 1998. Sugar Cane: Past and Present. Ethnobotanical leaflets. Illinois: Southern Illinois University.
- Shukla, J, y Mintz, Y, 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate. *Science* 215: 1498-1501.
- Silva, TGF, Moura, MSB, Zonier, S, do Carmo, JFA, Brandao, EO, y Souza, LSB. Análise da produtividade da água da cana de açúcar ittigada na região semi árida, Brasil. 2009. XVI Congresso brasileiro de agrometeorologia. Belo Horizonte, Brasil.
- Sinclair, TR, Tanner, CB, y Bennett, JM. 1984. Water-Use efficiency in crop production. *BioScience* 34 (1): 36-40.
- Singels, A, Donaldson, RA, y Smit, MA. 2005. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. *Field crops research* 92: 291-303.

- Singels, A, Smit, MA, Redshaw, KA, y Donaldson, RA. 2005. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. *Field crops research* 92: 249-260.
- Singels, A, y Smith, MT. 2006. Provision of irrigation scheduling advice to small-scale sugarcane growers using a web based crop model and cellular technology: A South African case study. *Irrigation and drainage* 55: 363-372.
- Singels, A, e Inman-Bamber, NG. 2011. Modelling genetic and environmental control of biomass partitioning at plant and phytomer level of sugarcane grown in controlled environments. *Crop and pasture science* 62 (1): 66-81.
- Singh, RD, Singh, PN, y Kumar, A. 2006. Evaluation of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) genotypes under variable water regimes. *Indian journal of crop sciences* 1(1-2): 142-145.
- Singh, PN, Shukla, SK, y Bhatnagar, VK. 2007. Optimizing soil moisture regime to increase water use efficiency of sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid complex) in subtropical India. *Agricultural Water Management* 90 (1-2): 95-100.
- Smith, DM, Inman-Bamber, NG, y Thorburn, PJ. 2005. Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research* 92:169–183.
- Southwick, LM, Willis, GH, y Selim, HM. 1992. Leaching of atrazine from sugarcane in southern Louisiana. *J. Agric. Food Chem.* 40 (7): 1264-1268.
- StatSoft, Inc., 2007: STATISTICA (data analysis software system), versión 8.0. URL: www.statsoft.com
- Stewart, LK, Charlesworth, PB, Bristow, KL, y Thorburn, PJ. 2006. Estimating deep drainage and nitrate leaching from the root zone under sugarcane using APSIM-SWIM. *Agricultural water management* 81 (3): 315-334.
- Stone, KC, Hunt, PG, Cantrell, KB, y Ro, KS. 2010. The potential impacts of biomass feedstock production on water resource availability. *Bioresource technology* 101: 2014-2025.
- Sudhakar, P, Latha, P, y Babu, M. 2010. Evaluation of sugarcane genotypes for high water use efficiency and thermostability tolerance under imposed moisture stress at formative stage. *Sugar technology* 12 (1): 72-75.
- Sugawara, LM, Adami, M, Rudorff, BF, y de Faria, VG. 2009. Avaliação de três métodos de estimativa de índice de área foliar aplicados à cana-de-Açúcar. *Anais XIV Simposio brasileiro de sensoramento remoto*. Natal, Brasil. Pp 499-506.
- Terán, CH, y Sopena, R. 2004. Evaluación de antecesores en la renovación de caña de azúcar. Expo Tucumán. INTA EEA Famaillá.
<http://www.agroinnova.gov.ar/agroinnova/pdfs/Panel%20%20-%20Producciones%20tradicionales/2.11.pdf>
- Thompson, GD. 1976. Water use by sugarcane. *South african sugar journal* 60 (II): 593-635.
- Thompson, GD. 1986. Agrometeorological and crop measurements in a field of irrigated sugarcane. Mount Edgecombe Research Report No.5. SASA Experiment Station, Mount Edgecombe, South Africa, p.244.

- Tonato, MJ, Ulivarri, JF, Alonso, JM, y Romero, ER. 2008. Teledetección de quema de cañaverales en la Provincia de Tucumán (Argentina) mediante sistema MODIS. *Revista industrial y agrícola de Tucumán* 85 (1): 31-35.
- Uhlenbrook, S. 2007. Biofuel and water cycle dynamics: what are the related challenges for hydrological processes research? *Hydrological process* 21 (26): 3647-3650.
- van Heerden, PDR, Donaldson, RA, Watt, DA, y Singels, A. 2010. Biomass accumulation in sugarcane: unraveling the factors underpinning reduced growth phenomena. *Journal of experimental botany* 61:2877-2887.
- Verburg, K, Keating, BA, Probert, ME, Bristow, KL, y Huth, NI. 1998. Nitrate leaching under sugarcane: interactions between crop yield, soil type and management strategies. 9th Australian Agronomy Conference, New South Wales, Australia.
- Viator, RP, Johnson, RM, Grimm, GC, y Richard, EPJ. 2006. Allelopathic, autotoxic and hormetic effects of postharvest sugarcane residue. *Agronomy journal* 98: 1526-1531.
- Viglizzo, EF, Frank, FC, Carreño, LV, Jobbágy, EG, Pereyra, H, Clatt, J, Pincén, D. y Ricard, MF. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology* 17(2): 959-973.
- Webster, PW, and Eavis, BW. 1971. The effect of flooding on sugar cane growth. I. Stage of growth and duration of flooding. *Proceedings of the international society of sugar cane technologists* 14: 708-714.
- Whitehead, PG, Wilby, RL, Battarbee, RW, Kernan, M, y Wade, AJ. 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological sciences* 54(1): 101-123.
- Wiegand, C, Anderson, G, Lingle, S, y Escobar, D. 1996. Soil salinity effects on crop growth and yield - illustration of an analysis and mapping methodology for sugarcane. *Journal of plant physiology* 148 (3-4): 418-424.
- Worrall, F, Swank, WT, y Burt, TP. 2003. Changes in stream nitrate concentrations due to land management practices, ecological succession, and climate: developing a systems approach to integrated catchment response. *Water resources research* 39: 1177.
- Yahaya; MS, Falaki; AM, Amans, EB, y Ishaya, DB. 2010. Growth and yield response of sugarcane (*Saccharum officinarum*) under different irrigation regimes and nitrogen rates. *Multidisciplinary journal of research development* 14 (1): 113-119.
- Yang, X, Zhou, Q, y Melville, MD. 1996. Estimating local sugarcane evapotranspiration using Landsat TM imagery. *Proceedings of 8th Australasian remote sensing conference, Canberra, Australia. Vol. 2, pp 262-269.*
- Yates, RA, y Taylor, RD. 1986. Water use efficiencies in relation to sugarcane yields. *Soil use and management* 2: 70-76.
- Zhang, X, Chen, L, Fu, B, Li, O, Oi, Z y Ma, Y. 2006. Soil organic carbon changes as influenced by agricultural land use and management: a case study in Yanhuai Basin, Beijing, China. *Acta Ecologica Sinica* 26: 3198-3203.
- Zhou, M. 2005. Potential of using physiological parameters to enhance sugarcane selection. *Proceedings of the south african sugarcane technology association* 79: 521-529.