

Afinando un balance hídrico para mejorar la programación de riegos: experiencias en el Ingenio San Carlos¹

Oscar Núñez¹ y Egbert Spaans²

1. Jefe de Agronomía, Ingenio San Carlos, Guayaquil, Ecuador
2. Presidente de ALIA2 y asesor del Ingenio San Carlos, Guayaquil, Ecuador

Resumen

En la zona cañera de la costa ecuatoriana, debido a la marcada estacionalidad de las lluvias, la práctica de regar es imprescindible para lograr altas productividades. El costo del riego en la zona por lo general alcanza de 20 a 30% del costo de producción de caña de azúcar. Es necesario contar con un balance hídrico (BH) que calcule con precisión el requerimiento de agua del cultivo para lograr un manejo eficiente del riego. Para afinar el BH del Ingenio San Carlos (ISC) se midió en el campo la Capacidad de Campo (CC) de los suelos más comunes del ISC. Además, se instalaron cuatro ensayos aplicando diferente número de riegos. Las mediciones de CC se hicieron usando dos diferentes métodos: con TDR (Time Domain Reflectometer) en 8 localidades y a partir de muestras de suelo sacadas con barreno después de lluvias de las cuales se obtuvo la humedad gravimétrica en 97 localidades. En los ensayos se evaluaron cuatro tratamientos: T1: regar siguiendo la recomendación del BH, T2: regar con 3 a 4 días de atraso en cada riego, T3: regar con 6 a 8 días de atraso en cada riego y T4: regar con 9 a 12 días de atraso en cada riego. Los valores de CC encontrados en las mediciones fueron mayores a las que se usan en el BH del ISC. Al cambiar los valores de CC por los encontrados en el estudio se produjo un incremento en la lámina de agua aprovechable que causa en promedio un alargamiento de 3 días en cada intervalo entre riegos. En los ensayos aplicando diferente número de riegos no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en productividad de caña (TCH). Se encontraron diferencias significativas, sin embargo, en humedad de suelo, humedad de vaina y en la diferencia entre la temperatura del follaje y la temperatura ambiente que indican que en el tratamiento con menos riegos se presentaron efectos fisiológicos que pueden ser relacionados con una reducción en la tasa de intercambio de gases y por lo tanto de acumulación de biomasa. Para evitar una reducción en la productividad de caña causada por estrés hídrico, es recomendable aplicar por lo menos el número de riegos aplicado en los T3. Alargar cada intervalo entre riegos en 3 a 4 días con respecto a la recomendación del BH del ISC no causará una reducción en la productividad de caña. Los resultados de las mediciones de capacidad de campo y de los ensayos son consistentes entre sí en el sentido que ambos estudios indican que es posible regar menos que lo que recomienda el actual BH del Ingenio.

¹ Presentado en el Primer Congreso Nacional de la Caña Azúcar y sus Derivados, organizado por la Asociación de Técnicos Azucareros del Ecuador (AETA), Milagro, septiembre 2009

Introducción

En la zona cañera de la costa ecuatoriana, el riego es una de las labores más importantes en el manejo del cultivo de caña de azúcar. El costo del riego llega a alcanzar hasta 30% del costo de producción (Estadísticas, Ingenio San Carlos, 2009). Además, tanto el déficit como el exceso de agua producen un estrés en la planta que a su vez causa una reducción en la productividad de biomasa y azúcar. Debido a la marcada estacionalidad de las lluvias en la zona, la práctica de regar es imprescindible para lograr altos rendimientos. Con el objetivo de mejorar la programación del riego en el Ingenio San Carlos (ISC), desde el año 2000 se utiliza como herramienta el sistema de balance hídrico (BH). El BH funciona como una contabilidad de agua que registra las entradas y salidas de agua pronosticando así la cantidad de agua presente en el suelo en un momento determinado. En consecuencia, el BH nos indica cuando el suelo llega al nivel de humedad que se ha definido como el punto crítico en el cual es necesario regar para evitar que la planta reduzca su tasa de producción de biomasa.

La ventaja de usar el BH para programar los riegos es que se mejora la precisión del cálculo que se realiza para determinar el requerimiento de agua sin necesidad de hacer mediciones frecuentes en el campo. Se gana precisión porque para su cálculo se consideran el tipo de suelo, el clima y la edad de la caña, que son los factores que más influyen en el consumo de agua del cultivo. Debido a la falta de datos reales de la zona del ISC, se implementó el sistema de BH asumiendo valores encontrados en la literatura para las variables necesarias para calcular la humedad presente en el suelo.

Para implementar el BH se necesita conocer la capacidad de campo del suelo (CC), el punto de marchitamiento permanente (PMP), el máximo descenso de humedad de suelo permitido (punto crítico de humedad), la evapo-transpiración (ET) y el coeficiente de consumo del cultivo (K). De todas estas variables la única que se mide en el ISC es la ET. Para medir la ET se ha utilizado un tanque Clase “A” donde se toman lecturas diarias o semanales en cuatro tanques situados en diferentes sectores del ISC. Con el objetivo de darle mayor precisión al BH se decidió en el 2006 determinar, por medio de mediciones en campo, la

CC de los suelos del ISC. Además, como otra medida para afinar el BH se llevaron a cabo ensayos en los que se evaluaron tratamientos con diferentes cantidades de agua suministradas a través del riego. Se instalaron cuatro ensayos en los que se evaluaron 4 tratamientos, incluyendo el riego siguiendo la recomendación del BH del ISC.

El presente trabajo muestra los resultados de las mediciones de capacidad de campo realizadas mediante dos diferentes métodos: TDR (Time Domain Reflectometer) y determinación de humedad gravimétrica. Los valores de CC encontrados en este estudio se comparan con los tomados de la literatura para el BH del ISC. Se presentan también los resultados obtenidos al aplicar cuatro diferentes regímenes de riego en cuatro experimentos evaluados entre los años 2006 y 2008.

Marco teórico

El balance hídrico es una contabilidad de las entradas y salidas de agua que presenta un sistema. En cualquier ecosistema, el balance hídrico se puede determinar calculando los cambios en entradas, salidas y almacenamiento de agua que ocurren en el suelo. Los flujos de entrada más importante son el riego y las lluvias; y el mayor flujo de salida es la evapotranspiración (ET), que está compuesta por la evaporación de agua directa desde la superficie del suelo y la transpiración que ocurre desde el follaje del cultivo. También pueden ocurrir flujos de entrada por ascenso capilar del agua freática hacia la zona de absorción radicular. El exceso de agua que el suelo no es capaz de almacenar sale del sistema por medio de la escorrentía superficial y de la precolación a estratos de suelo más profundos.

La CC es la cantidad de agua que un suelo puede retener después de que la gravedad ha terminado de drenar el agua del suelo, lo cual ocurre usualmente 1 a 2 días después de una lluvia o riego que saturan el suelo. La CC de un suelo es una característica que debe ser medida en el campo si se quiere asegurar que se está utilizando el valor correcto en el BH. La mayoría de datos de CC que se encuentran en la literatura han sido obtenidos a partir de mediciones en laboratorio por diversos métodos (Ruiz et. al. 2003). Uno de los más

difundidos es el de equivalente de humedad, en el que muestras de suelos previamente saturadas con agua son sometidas a una fuerza centrífuga de diez mil veces la gravedad durante 30 minutos. Esa fuerza, en centrífuga con rotor específico, equivale a un potencial de -33 kPa (Cassel y Nielsen, 1986 citados por Ruiz et. al. 2003).

Es ampliamente reconocido en la literatura que la CC no es una constante de humedad del suelo y se admite que la CC no presenta un valor único. Ruiz et. al. (2003) determinaron que en suelos de regiones tropical-húmedas la CC ocurre a potenciales mayores que -33 kPa. Salter y Haworth (1961) compararon dos métodos para obtener el contenido de humedad del suelo en CC y encontraron que el método en campo muestreando suelos después del riego cuando el drenaje casi ha cesado dio resultados más precisos y consistentes que los obtenidos en laboratorio con el plato de succión usando cualquier tensión.

Para el cálculo del BH del ISC se considera que el contenido de agua de un suelo llega a CC después de cada riego o lluvia. A partir de este momento se empieza a estimar la ET de cada lote, multiplicando la evaporación registrada en el tanque clase A por el factor de consumo de cultivo que va aumentando gradualmente de 0.3 a 1.0 con la edad del cultivo. Cuando el cultivo ha consumido el 25% del agua almacenada entre CC y el punto de marchitamiento permanente (PMP) en suelo francos y arenosos y 20% en suelos arcillosos, el programa recomienda regar.

Materiales y Métodos

Determinación de la capacidad de campo

Todas las muestras se tomaron dentro de lotes cultivados con caña de azúcar sembrada a 1.5 m de distancia entre surcos. Se determinó la capacidad de campo midiendo la humedad del suelo por dos métodos, con TDR marca Hydrosense® expresada en humedad volumétrica y la humedad gravimétrica de muestras sacadas con barreno a una profundidad

de 0-30 cm. Las mediciones se hicieron inmediatamente después de la cosecha así no hubo un cultivo presente en el momento de la medición.

En ocho lotes con tres diferentes texturas (4 francos, 2 franco arcillosos y 2 franco arenosos) se levantaron dos diques (muros) de aproximadamente 25 cm en el fondo del surco a 2 m de distancia para represar agua en esta área de $2 \times 1.5 \text{ m}^2$ y así saturar el suelo para asegurar que la humedad llegue a CC una vez que se ha drenado el exceso de agua. Una vez que el agua se había infiltrado, se instaló el Hydrosense® en el área humedecida y se tapó con un plástico para evitar pérdidas de agua por evaporación del suelo. Se tomaron lecturas del Hydrosense® cada seis horas hasta que la humedad se estabilizó en un valor que se considera la CC del suelo. La ventaja de usar el Hydrosense® es que permite monitorear el agua en el suelo en el mismo punto por tratarse de un método no destructivo.

Paralelamente, se tomó una muestra de suelo para determinar la humedad gravimétrica en el momento que la humedad del suelo se estabilizó, porque este método es la referencia para contenido de agua en el suelo. Las mediciones de humedad con Hydrosense® nos permitieron observar como el contenido de agua en el suelo se baja mientras que la gravedad drena el agua y así determinar cuando la humedad del suelo se estabiliza después de estar saturado lo cual es el momento que el suelo ha llegado a CC.

Adicionalmente, para incrementar la cantidad de datos de CC que se tenían, en el invierno se midió la humedad gravimétrica y la densidad aparente en 97 lotes después de 36 a 60 horas de una lluvia que saturó los suelos. Se asumió que los suelos estaban en CC al momento del muestreo basados en los resultados obtenidos con el Hydrosense®, que indican que la CC se alcanza 6 a 42 horas después de drenar el exceso de saturación y se mantiene 60 horas después. Todos los valores de capacidad de campo mencionados en el presente estudio se refieren a una profundidad de 0 –30 cm.

Ensayos aplicando diferente número de riegos

Se instalaron dos ensayos en la temporada 2006-2007 en los cuales se evaluaron cuatro tratamientos: T1: riego según lo programado por el BH, T2: tres días de atraso en cada riego programado por el BH, T3: seis días de atraso en cada riego programado por el BH y T4: nueve días de atraso en cada riego programado por el BH. La cantidad de riegos en cada tratamiento se puede apreciar en la Tabla 1. Es evidente que en cuanto mayor el atraso, más riegos se ahorra lo cual tiene un impacto económico importante. El suelo del Ensayo 1 fue de textura franca (Lámina de almacenamiento de agua = 51 mm), mientras que en el Ensayo 2 el suelo fue franco-arenoso (LAA = 38 mm). Las mediciones de evaporación se tomaron de tanques diferentes para cada ensayo.

Tabla 1. Número de riegos aplicados en cada tratamiento en zafra 2006-2007.

Tratamientos	Número de riegos	
	Ensayo 1	Ensayo 2
Según BH – T1	11	12
3 dda* – T2	10	9
6 dda – T3	8	8
9 dda –T4	7	6

*=días de atraso

En la temporada 2007-2008 se instalaron dos ensayos adicionales similares en los que también se evaluaron cuatro tratamientos. Al igual que en los ensayos instalados en la temporada anterior, el T1 se lo regó según lo programado por el BH. En los tratamientos 2, 3 y 4 se atrasó el riego con respecto a la fecha programada por el BH en 4, 8 y 12 días en cada riego, respectivamente. El número de riegos aplicadas en los diferentes tratamientos se presentan en la Tabla 2. El Ensayo 3 se desarrolló en un suelo de textura franco-limosa (LAA = 51 mm) y el Ensayo 4 en un suelo franco arenoso (LAA = 38 mm). Para ambos

ensayos se midió la evaporación del mismo tanque por la cercanía de los dos ensayos al tanque.

Tabla 2. Número de riegos aplicados en cada tratamiento en zafra 2007-2008

Tratamientos	Número de riegos	
	Ensayo 3	Ensayo 4
Según BH –T1	10	14
4 dda – T2	8	10
8 dda – T3	7	8
12 dda – T4	6	6

Los tratamientos fueron escogidos con base en observaciones de campo y pruebas realizadas en años anteriores en las que se observó que aparentemente el BH del ISC recomendaba más riegos de lo necesario. Así, en todos los ensayos el tratamiento que se regó bajo las recomendaciones del BH siempre fue el que más agua recibió. En todos los ensayos se evaluaron cuatro tratamientos con tres repeticiones, dando un total de 12 parcelas por ensayo. Cada parcela fue una unidad experimental. El tamaño de la parcela fue de 12 surcos (18 m.) de ancho por 70 a 100 m. de largo. Se tomaron las mediciones de los seis surcos centrales, manteniéndose una distancia de 9 metros para minimizar la influencia de un tratamiento al otro. El área total de los ensayos estuvo entre 1.5 y 2.2 ha.

En los cuatro ensayos se midió la humedad del suelo 24 horas antes del riego, 24 horas después del riego y luego semanalmente hasta 24 horas antes del siguiente riego. En total, en cada parcela se tomaron de 20 a 30 muestras de suelo, cada muestra estuvo compuesta de 6 barrenazos. La humedad de suelo se determinó secando la muestra en un horno a 105°C hasta obtener un peso constante de la muestra. Con la misma frecuencia que las mediciones de humedad de suelo, se midió la temperatura del follaje y del ambiente (al mismo tiempo) con un termómetro infrarrojo para determinar la diferencia que hay entre la temperatura de la planta y la del ambiente. Se midió la temperatura de 5 plantas por parcela

en cada medición. Para determinar la temperatura de cada planta se midió la temperatura en cinco puntos diferentes en cada planta. En la zafra 2006-2007 se hicieron las mediciones entre las 12:00 y 13:00 y en la zafra 2007-2008 se tomó la temperatura entre las 15:00 y 16:00. A partir de los dos meses de edad del cultivo, se tomaron muestras de la vaina de la planta en cinco plantas por parcela y se determinó la humedad secando la muestra a 55°C hasta obtener peso constante. Se realizaron perforaciones de suelo en todos los ensayos para determinar la profundidad del nivel freático y así poder determinar si fue posible un aporte de agua de la capa freática. Se hizo una perforación por tratamiento.

La cosecha se realizó a los 12 meses en los ensayos instalados en la temporada 2006. En los ensayos instalados en el 2007 se cosechó a los 7 meses, una vez que se terminó la estación seca (época de riegos) y comenzó la estación de lluvias, con el objetivo de captar en el tonelaje el efecto de dar diferente número de riegos. El análisis estadístico de las variables evaluadas se hizo con el programa Infostat, se realizó análisis de varianza y para la comparación de medias se aplicó la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad.

Resultados y discusión

Determinación de capacidad de campo

Drenaje de saturación a capacidad de campo

El proceso de drenaje del agua del suelo a partir de saturación se muestra en la Figura 1. Esto es un ejemplo clásico de cómo el agua sale del suelo hacia abajo. La tasa de descenso de agua va reduciéndose paulatinamente hasta llegar al punto de CC, cuando el proceso de drenaje se ha terminado. Puesto que la superficie del suelo está tapada con plástico y no hay plantas, no hay ET. Por lo tanto, en este experimento el contenido de agua en el suelo al haber llegado a CC debería mantenerse constante.

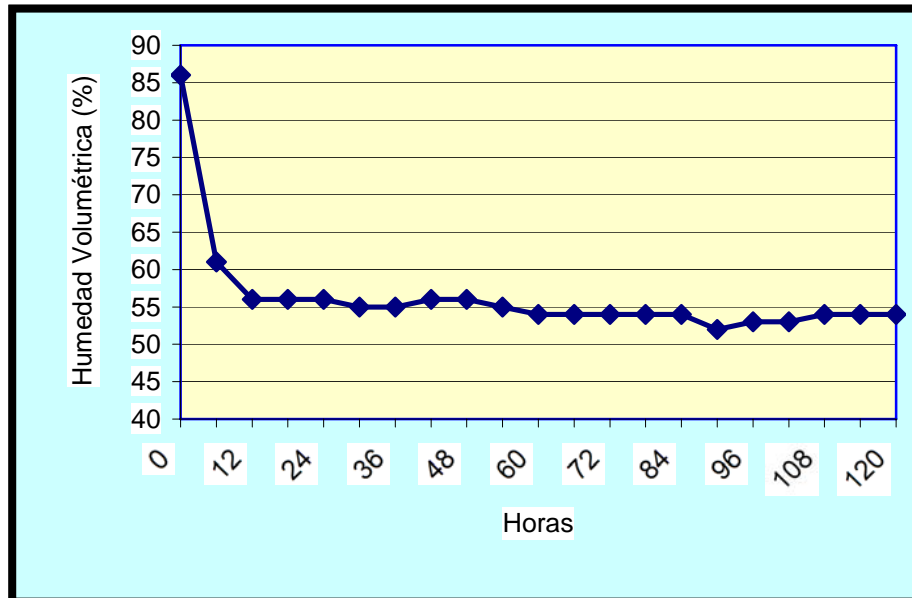


Figura 1. Descenso de humedad a partir de saturación en un suelo de textura franca

Valores de capacidad de campo en suelos del ISC

Los valores de CC expresados en contenido de agua gravimétrico y volumétrico se presentan en la Tabla 3. Como el fin del estudio es mejorar el BH, la mejor forma de discutir el contenido de agua es con base en volumen. Los valores de CC encontrados en el experimento son mucho más altos que los reportados en la literatura, lo cual indica que los suelos del ISC tienen mayor capacidad de retención de agua que lo reportado en la literatura usada para implementar el BH (Tabla 4). El experimento mide la verdadera CC porque el suelo estaba saturado en todo su perfil al inicio del experimento. Así se aseguró que la única fuerza para la distribución de agua en el perfil sea la gravedad.

Después de una lluvia, sin embargo, el suelo probablemente no se saturó en todo su perfil, entonces el subsuelo al mantenerse no saturado sigue absorbiendo agua de la capa superior por fuerzas mátricas. Bajo esas condiciones, el agua desciende además de por la gravedad,

por las fuerzas mátricas. Por esta razón, los valores después de la lluvia presentados en la Tabla 4 son inferiores a los del experimento.

La misma situación sucede durante un riego, por lo tanto después de un riego la capa superior del suelo probablemente se encuentra con un contenido de agua inferior a la CC. Por esta razón, no debemos simplemente utilizar el valor verdadero de CC en el BH del ISC. Los niveles de humedad del suelo que se alcanzan después de la lluvia en el ISC son los que se deben incorporar al BH en reemplazo de los de la literatura ya que son más representativos de la realidad que los del experimento. Los valores después de la lluvia son más altos que los valores de la literatura pero menores que los del experimento (Tabla 4).

Ahora, la cantidad de agua que la capa superior luego de secarse por la ET logra recuperar del suelo de las capas inferiores no está bien definida. Para aclarar este proceso hay que estudiar la distribución del agua en el perfil del suelo de un riego al otro. También queda por aclarar el nivel de humedad, en los diferentes suelos, en el cual la planta empieza a sufrir estrés hídrico y la productividad del cultivo se ve perjudicada. Esto último buscamos determinarlo con los ensayos en los que se evaluaron tratamientos con diferente número de riegos.

Se puede ver que los tiempos requeridos para llegar a CC varían entre 6 y 42 horas, lo que coincide con lo reportado en la literatura. Observamos también que la calibración general con la cual el Hydrosense® está programado no resulta en valores reales de agua volumétrica, puesto que son considerablemente superiores a los valores obtenidos en las muestras extraídas con el barreno. Por lo tanto, no se debe utilizar la calibración general sino generar una calibración propia para las condiciones del ISC, para obtener datos absolutos de agua volumétrica. Sin embargo, el Hydrosense® sí permitió ver tendencias y monitorear el proceso de drenaje en el suelo.

Tabla 3. Humedad gravimétrica y volumétrica del suelo en CC en muestras tomadas con barreno y tiempo para llegar a CC después de saturación medido con Hydrosense®

Textura	Barreno		Hydrosense®
	W (%)	θ (%)	Tiempo (horas)
Arcilloso	44	56	12
Arcilloso	41	63	0
Franco	38	46	12
Franco	29	52	6
Franco	31	50	18
Franco	31	47	12
Arenoso	23	33	6
Arenoso	27	36	42

Tabla 4. Valor de CC utilizado en el BH del ISC, valor obtenido en el experimento y valor después de la lluvia

Textura	Capacidad de campo en humedad volumétrica (%)		
	Literatura (BH del ISC)*	Experimento CC	Valor después de lluvia
Arcilloso	45%	60%	51%
Franco	38%	49%	44%
Arenoso	28%	35%	32%

*: Israelsen y Hansen, 1964, citados por Romanella, 1981

Debido a que la evaporación (consumo de agua) se mide en lámina de agua expresada en la unidad de milímetros, el BH del ISC ha sido desarrollado expresando las cantidades de agua en milímetros. Los valores de lámina de almacenamiento de agua (LAA) y lámina de agua rápidamente aprovechable (LARA) que se obtuvieron después de la lluvia y de la

literatura se comparan en la Tabla 5. La LAA es el agua que se encuentra retenida en el suelo entre CC y PMP, la LARA es la fracción de la LAA que la planta puede absorber sin pasar por restricciones fisiológicas. En el BH del ISC se ha definido que la LARA es el 50% de la LAA en suelos francos y arenosos, mientras que en suelos arcillosos la LARA es 40% de la LAA. Se observa que al cambiar en el BH los valores de la capacidad de campo de la literatura por los obtenidos después de las lluvias, existiría un alargamiento del tiempo que pasa entre riegos de 3 días, considerando un valor de evaporación promedio para la zona (2.5 mm/día). Por lo tanto, al realizar el cambio de los valores de CC en el BH del ISC se reduce el número de riegos necesarios para cubrir la demanda anual de agua del cultivo. Para implementar el BH en el ISC, se consideró que el punto de marchitamiento permanente es el 50% del valor de la capacidad de campo (Israelsen y Hansen, 1964 citados por Romanella, 1981) y la LARA es el 50% de la LAA en suelos francos y arenosos y 40% en suelos arcillosos. Los valores de LAA encontrados son asumiendo una profundidad de 30 cm, que es la que se usa en el BH del ISC hasta los 6 meses de edad en que se cambia por 45 cm. La capacidad de retención de humedad aprovechable de los suelos del ISC es de alrededor de 1 mm de agua por cada centímetro de profundidad de suelo, este resultado es similar al obtenido por Torres et. al. (20004) en mediciones realizadas en los suelos cañeros de Colombia donde encontraron una retención de 1 a 2 mm.

Tabla 5. Comparación de láminas entre valores de literatura (BH-ISC) y los presentados en este estudio después de lluvia. En la última columna se presenta el número de días que se alargan los intervalos entre riegos como consecuencia de utilizar los nuevos valores de la CC>.

Suelo	LAA después de lluvia (mm)	LAA BH-ISC (mm)	LARA después de lluvia (mm)	LARA BH-ISC (mm)	Diferencia en días
Arcilloso	77	61	31	24	3
Franco	66	51	33	26	3
Arenoso	52	38	26	19	3

Ensayos aplicando diferente número de riegos

En los cuatro ensayos no existieron diferencias significativas entre los tratamientos en el tonelaje final de caña a la cosecha (TCH). Sin embargo, en los cuatro ensayos sí existió la tendencia a obtenerse menor productividad de caña con el tratamiento que menos riegos recibió (T4). En dos de los ensayos (2 y 4), las mediciones de humedad de vaina y de temperatura de hoja siguen la misma tendencia en el sentido que bajo el T4 el cultivo estuvo más seco y más caliente con respecto al ambiente. En el Ensayo 1 no se observó la tendencia en ninguna de las variables que miden el estado fisiológico de la caña y se puede inferir que por la profundidad del nivel freático es muy probable que exista aporte de agua proveniente de esta fuente (Tabla 9).

Humedad del suelo

En dos de los cuatro ensayos bajo estudio se presentaron diferencias significativas entre tratamientos en humedad de suelo (Ensayos 3 y 4). Los datos de humedad de suelo son promedios obtenidos de medir antes y después del riego y luego semanalmente antes del siguiente riego. En los cuatro ensayos la humedad de suelo fue menor en el tratamiento

que menos se regó (Tabla 6). La tendencia de los promedios indica que se logró dejar secar más el suelo en el estrato 0-30 cm con los tratamientos que menos se regaron. En los Ensayos 1 y 2 no existió diferencia significativa entre los tratamientos. En el Ensayo 3 existió diferencia entre el T1 y los T2 y T4. En el Ensayo 4 el suelo en el Tratamiento 1 estuvo significativamente más húmedo que en el Tratamiento 4. La tendencia encontrada en los resultados y la significación en dos de los cuatro ensayos sugieren un umbral de número de riegos en el cual las diferencias significativas en humedad de suelo empiezan a ocurrir. Por lo tanto, si el objetivo fuera mantener la humedad del suelo en niveles altos, en el caso de los ensayos 3 y 4, se recomendaría aplicar por lo menos la cantidad de riegos aplicados bajo el T3 (7 y 8 riegos) y no bajar a niveles como los del T4 (6 riegos).

Tabla 6. Humedad gravimétrica de suelo

Tratamientos	Humedad de suelo (%)			
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
T1	29.5 a	23.2 a	33.8 a	24.0 a
T2	29.8 a	24.9 a	32.0 b	24.3 a
T3	29.1 a	22.2 a	32.5 ab	22.8 ab
T4	28.8 a	20.7 a	31.8 b	20.9 b

Humedad de la vaina

La tendencia de la humedad de la vaina entre tratamientos no fue igual en los cuatro ensayos. En los Ensayos 2 y 4 existieron diferencias significativas entre los tratamientos, en estos dos ensayos el T4 tuvo una humedad de vaina significativamente más baja que la de los otros tres tratamientos (Tabla 7). Los resultados obtenidos en las mediciones de humedad de vaina muestran que los tratamientos aplicados comienzan a marcar diferencias en el estado de humedad del cultivo. Para el caso de los ensayos 2 y 4 se puede afirmar que con 6 riegos la planta estuvo significativamente más seca que cuando se dieron 8 riegos,

pero más de 8 riegos no aumentaron la humedad de la planta. En los ensayos 1 y 3, todos los tratamientos presentaron igual nivel de humedad de vaina, lo cual indica que la planta logró mantener el mismo nivel de humedad con 7 a 11 riegos en el caso del ensayo 1 y con 6 a 10 riegos en caso del ensayo 3.

Tabla 7. Humedad de la vaina

Tratamientos	Humedad de vaina (%)			
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
T1	82.7 a	85.9 a	83.8 a	84.0 ab
T2	83.2 a	85.0 a	83.7 a	84.2 a
T3	82.6 a	84.6 ab	83.8 a	83.9 ab
T4	82.9 a	84.0 b	83.1 a	83.2 b

Temperatura de la hoja

Se observa que la diferencia entre la temperatura de la hoja y la temperatura ambiente es positiva en todos los casos en los ensayos 1 y 2 y negativa en todos los casos en los ensayos 3 y 4 (Tabla 8). Esto ocurrió debido a que en los Ensayos 1 y 2 las mediciones se hicieron en horas del medio día (12:00 – 13:00) cuando la hoja presenta una temperatura más alta que la del ambiente (24.4° C), mientras que en los Ensayos 3 y 4 las mediciones se hicieron por la tarde (15:00 – 16:00) cuando la hoja siempre estuvo más fría que el ambiente (28.6° C). Este hecho muestra que los resultados de estas mediciones son sensibles a la temperatura ambiente del momento en que se realiza el muestreo. Se encontraron diferencias significativas en los cuatro ensayos. En los ensayos 2 y 4 las diferencias pueden atribuirse a la cantidad de riegos aplicados. En el ensayo 2, las hojas de los tratamientos que más riegos recibieron (T1 y T2) presentaron temperaturas significativamente más bajas que las registradas en las hojas de los tratamientos que menos riegos recibieron (T3 y T4). La menor disponibilidad de agua en los T3 y T4 seguramente causó una reducción en la

conductividad de los estomas que redujo la transpiración e incrementó la temperatura del follaje. La relación entre transpiración y fotosíntesis es directamente proporcional ya que por la misma estoma sale el vapor de agua (transpiración) y entra el dióxido de carbono (fotosíntesis). En el ensayo 4, el follaje del T4 no tuvo la misma capacidad para enfriarse que tuvieron los otros tratamientos. Los resultados obtenidos midiendo temperatura de hoja son consistentes con los de humedad de la vaina. Los resultados muestran que en los tratamientos que menos riegos se aplicaron comenzaron a presentarse efectos fisiológicos en la planta que se relacionan con una menor disponibilidad de agua.

Tabla 8. Diferencia de temperatura entre la hoja y el ambiente

Tratamientos	Temp. hoja – Temp. ambiente (°C)			
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
T1	1.70 ab	0.75 a	-1.26 a	-1.99 ab
T2	1.96 b	0.77 a	-1.21 a	-1.75 b
T3	1.70 ab	1.83 b	-1.76 b	-2.13 a
T4	1.45 a	2.18 b	-1.48 ab	-0.84 c

Nivel freático

Los datos de la profundidad del nivel freático muestran que solamente en uno de los ensayos el nivel fue menor a 1 m. El ensayo 1 tuvo su nivel freático a 0.99m de profundidad. Las raíces de la caña, en suelo como el del ensayo 1, llegan normalmente hasta los 70 a 80 cm. Además, por la textura del suelo (franco) debe existir movimiento capilar del agua hacia estratos de suelo con mayor densidad de raíces. Es poco probable que en los otros tres ensayos se haya producido un aporte significativo de agua freática al cultivo. El aporte de agua del nivel freático en el Ensayo 1 explicaría porqué el cultivo

logró mantener la humedad de la vaina y la diferencia entre temperatura de hoja y ambiente al mismo nivel con los cuatro tratamientos.

Tabla 9. Nivel freático en los ensayos durante la época seca

	Profundidad del nivel freático (m)
Ensayo 1	0.99
Ensayo 2	2.00
Ensayo 3	1.93
Ensayo 4	1.95

Productividad de caña (TCH)

No se presentaron diferencias significativas entre tratamientos en ninguno de los cuatro ensayos bajo estudio (Tabla 10). En los cuatro ensayos, sin embargo, en el tratamiento que menos riegos se aplicó se obtuvo la productividad más baja. A pesar de no encontrarse diferencias significativas en productividad entre los tratamientos, las tendencias encontradas en las mediciones de humedad de suelo, humedad de vaina y temperatura de hoja sugieren que la productividad de caña probablemente decaerá si se aplica la cantidad de riegos aplicada en el T4. En consecuencia, para estar seguros de no causar una reducción en la producción por estrés hídrico sería lógico recomendar que, bajo las condiciones de estos ensayos, se apliquen por lo menos el número de riegos aplicados en el T3 (7 a 8 riegos).

Tabla10. Productividad de caña

Tratamientos	Productividad de caña (TCH)			
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
T1	79.7 a	54.5 a	56.7 a	59.7 a
T2	80.5 a	56.7 a	56.1 a	62.3 a
T3	78.4 a	60.0 a	65.6 a	53.2 a
T4	73.9 a	45.5 a	53.1 a	49.7 a

Conclusiones

Los valores de capacidad de campo de los suelos del Ingenio San Carlos resultaron más altos que los valores que fueron tomados de la literatura para iniciar la implementación del programa de balance hídrico del Ingenio. La incorporación de los valores de capacidad de campo encontrados en este estudio al balance hídrico del Ingenio causó un incremento de la LAA de 7 mm en los tres tipos de suelo. Este cambio en la LAA produce un alargamiento promedio de 3 días en cada intervalo entre riegos, lo que representa aplicar de 1 a 3 riegos menos en un año. Por lo tanto, con los valores de capacidad de campo encontrados en las mediciones se reduce el número de riegos que recomienda el balance hídrico por una mayor retención de agua del suelo.

En los ensayos aplicando diferente número de riegos no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en productividad de caña (TCH). Se encontraron diferencias significativas, sin embargo, en humedad de suelo, humedad de vaina y en la diferencia entre la temperatura del follaje y la temperatura ambiente que indican que en el tratamiento con menos riegos se presentan efectos fisiológicos que pueden ser relacionados con una reducción en la tasa de intercambio de gases y de acumulación de biomasa. Los resultados permiten inferir que para evitar una reducción en la productividad de caña por estrés hídrico, será recomendable aplicar por lo menos el número de riegos aplicado en los

T3. Estos resultados permiten concluir que alargar cada intervalo entre riegos en 3 a 4 días no causará una reducción en la productividad de caña. Los resultados de las mediciones de capacidad de campo y de los ensayos son consistentes entre sí en el sentido que ambos estudios indican que es posible regar menos que lo que recomienda el actual balance hídrico del Ingenio. En el Ensayo 1, es probable que el aporte de agua de la capa freática haya contribuido con mantener niveles similares entre tratamientos en las variables evaluadas. Para manejar con eficiencia el riego, será importante revisar la profundidad del nivel freático para determinar si existe aporte de agua por esta vía.

Bibliografía

Romanella, C.A., Preparación y manejo de suelos para riego. Comisión de Estudios para el Desarrollo de la Cuenca del Río Guayas (Cedegé). Ecuador, 1981.

Ruiz, H.A., Ferreira, G.B., Pereira, J.B. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarenicos pela determinação do equivalente de umidade. Revista Brasileira de Ciencia do Solo, vol. 27 (2). Viçosa, 2003.

Salter, P.J.; Haworth, F. The available water capacity of a sandy loam soil. I. A critical comparison of methods of determining the moisture content of soil at field capacity and at the permanent wilting percentage. European Journal of Soil Science, volume 12 (2), p. 326-324. 1961.

Torres, A., Cruz, J.S., Villegas, T., Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar. Segunda edición. Cali, Cenicaña. 66p (Serie Técnica 33).