



Capítulo II.

Sistemas de riego por pivote central para la producción de biomasa a gran escala en el Caribe seco

Sofiane Ouazaa, Claudia Maricel Ipaz Cuastumal, César Augusto Terán-Chaves y Guillermo Alberto Brochero Aldana



Introducción

El recurso agua es un insumo importante para la sociedad, y su preservación es un reto constante (Samian et al., 2015), pues la disponibilidad del agua dulce en el planeta es limitada (Cisneros et al., 2014; Yacoubi et al., 2012). La producción agrícola es la mayor consumidora de agua, por lo que se debe propender por un uso eficiente (Castro Popoca et al., 2008), considerando que el planeta Tierra tiene un área aproximada con cultivos de 1.527 millones de hectáreas, y el 19,7% de ellas se encuentra bajo riego (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2011).

En Colombia hay 18 millones de hectáreas que tienen potencial para ser irrigadas, pero en la actualidad solo un millón está en riego, lo que equivale al 6%. Para 2038, el Gobierno aspira a alcanzar una cobertura del 10%, con 744.000 hectáreas adicionales irrigadas. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el sector privado ha desarrollado y manejado casi dos tercios de la superficie regable, principalmente a pequeña escala, mientras que el resto ha sido ejecutado por el sector público. En 2011, la superficie total cosechada de cultivos con infraestructura para riego ascendió a 524.000 ha, de las cuales 245.000 fueron de arroz (47%) y 168.000 de caña de azúcar (32%).

El riego es indispensable en la producción, por lo que debe realizarse con una alta eficiencia y uniformidad, que garantice su uso racional (Ouazaa et al., 2015). Los métodos de riego por gravedad son los más comunes para aplicar el agua en los terrenos agrícolas en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas a nivel mundial, y Colombia no es la excepción (Benjamin et al., 1994; González-Camacho et al., 2006). Sin embargo, debido a las bajas eficiencias del riego por gravedad, es preciso investigar alternativas eficientes en el manejo del riego (Flores-Gallardo et al., 2014).

En estas condiciones, el uso eficiente del agua mejora el rendimiento económico por medio de la reducción del consumo del agua y la energía (Samian et al., 2015; Yacoubi et al., 2012), además de que mitiga impactos ambientales adversos (Louie & Selker, 2000). Entre otras herramientas que promueven el uso racional del agua, se tienen sistemas de



riego de mayor eficiencia, técnicas de agricultura de precisión (Levy et al., 2013), la tecnificación del riego, la operación de este de acuerdo con su diseño (De la Cruz Tun Dzul et al., 2011) y el uso racional del recurso, evitando aplicar cantidades que generen déficit o exceso de agua, lo que induciría a pérdidas y bajas eficiencias (Flórez-Tuta et al., 2013).

El departamento del Cesar cuenta con un régimen hídrico deficitario en dos épocas secas del año; por otra parte, el desarrollo pecuario está liderado por la ganadería en unos terrenos que permiten mecanizar la producción agropecuaria, y se cuenta con una fuente de agua subterránea de acuíferos recargables. En este capítulo se evaluó la tecnología del sistema de riego por pivote central para la producción de forrajes a escala comercial, como una alternativa orientada hacia el uso eficiente del recurso hídrico y del suelo; para tal fin, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar un sistema de riego por pivote central para una superficie de 30,5 ha.
2. Elaborar programas de riego en función de los cultivos, su desarrollo y la variación espacial de la humedad del suelo.
3. Implementar el sistema de control de aplicación de riego diferenciado en función del requerimiento hídrico de los cultivos.
4. Evaluar y comparar los rendimientos de los tres cultivos (maíz, sorgo y pasto) y las láminas de riego aplicadas.

Generalidades de los sistemas de riego por pivote central

El sistema de riego por aspersión por pivote central presenta unas características especiales en sus componentes y funcionalidad, que se describen a continuación.

El pivote central: dispositivo móvil de riego por aspersión

Las máquinas de riego por aspersión autopropulsadas han tenido gran éxito frente a otros sistemas de riego (Ouazaa et al., 2015) debido a que presentan ventajas como la alta uniformidad y eficiencia de aplicación, la automatización y la posibilidad de aplicar agua y fertilizantes, a través de los sistemas, en distintas condiciones topográficas (Evans & King, 2012). El sistema de riego por pivote central permite conducir el agua a través de una tubería metálica de acero galvanizado o aluminio, la cual es



montada sobre torres metálicas soportadas y movidas sobre unos neumáticos que son accionados por motores eléctricos; de esta manera, el pivote gira circularmente, sobre su eje, manteniendo uno de sus extremos fijo en el centro del campo. A lo largo de la tubería cuelgan los aspersores, distribuidos y puestos en marcha de acuerdo con los requerimientos hídricos del cultivo, el clima, la especie, la topografía y demás condiciones. El agua es aplicada en forma de “lluvia”, más o menos intensa, variable o uniforme, sobre la superficie del suelo, con el fin de que el agua se infiltre en los puntos donde cae.

La tecnología del sistema de riego por pivote central fue desarrollada en 1950, en Nebraska, Estados Unidos, y en 1968 ya se tenía un sistema reversible de transmisión eléctrica, que en la actualidad es conocido a nivel mundial. El riego por pivote central se caracteriza por ser automatizado, versátil y flexible, de desplazamiento continuo en su operación, y por aplicar agua en forma de lluvia controlada y uniforme sobre las tierras, con el propósito de que esta se infiltre en el sitio específico donde cae (FAO, 2001).

El uso de las máquinas automotrices como sistema de riego ha tenido buena acogida debido a que estas disminuyen el costo de inversión por hectárea irrigada, por sus menores requerimientos energéticos y de mano de obra, porque permiten la inyección de agroquímicos, por su fácil adaptación a la topografía, el clima y el cultivo, y por su alto nivel de automatización (Allen et al., 2000; Evans & King, 2012). Gracias a esa versatilidad, el pivote central no requiere de la adecuación de zanjas y movimientos de tierra, lo que ayuda a mantener en superficie el horizonte orgánico del suelo, sus propiedades físicas y las condiciones favorables para la mecanización (Tarjuelo et al., 1996).

Las primeras versiones de los pivotes contaban con motores hidráulicos, que más adelante se cambiaron por motores eléctricos, lo que brindó ventajas operacionales. La principal diferencia entre ambos sistemas está en el motor de accionamiento de los pivotes. El pivote eléctrico funciona con electricidad y se enciende cuando se requiere mover las torres; esto permite detener y accionar los motores cientos de veces durante su operación, de forma sincronizada entre las torres, para generar el movimiento, mientras que el pivote hidráulico funciona con la misma agua de riego. El sistema hidráulico está siempre alineado, ya que todas las ruedas se mueven de forma simultánea. Por su parte, el movimiento del pivote eléctrico garantiza una mayor vida útil de los engranajes, una mayor eficiencia y un menor costo operativo. Los sistemas



de accionamiento eléctrico (figura 2.1a) permiten variar la velocidad de avance desde 0 hasta el 100 %, mientras que los equipos hidráulicos (figura 2.1b) regulan el avance



a partir del 30 %, por lo que estos equipos presentan la limitación de solo aplicar láminas bajas.

Figura 2.1. Sistema de riego por pivote central. a. Eléctrico; b. Hidráulico.

Fotos: a. Claudia Maricel Ipaz Cuastumal; b. Sofiane Ouazza

El adelanto tecnológico de los emisores desplazó el uso de los aspersores de impacto en los sistemas de riego automotores, pues los emisores requieren menor presión para su operación (DeBoer et al., 2000; Kincaid et al., 2000). Los más utilizados en máquinas automotrices son los emisores de plato fijo y de plato rotatorio (productos de Nelson Irrigation), y los emisores de tecnología I-Wobbler (productos de la fábrica Senninger). La tecnología I-Wobbler (figura 2.2) refiere a emisores de rotación con un deflector ranurado combinado con una acción oscilante, con lo que proporcionan una mejor uniformidad para la aplicación del agua. Los aspersores Wobbler distribuyen gotas con menor intensidad de aplicación, sobre una mayor área de cobertura, a bajas presiones.



Figura 2.2. Emisor I-Wobbler.

Foto: Guillermo Alberto Brochero Aldana

Indicadores de funcionamiento

El uso del pivote central como sistema de riego es de interés para los productores agrícolas por varias razones: su menor costo de inversión por hectárea regada, su versatilidad operativa, la automatización, la aplicación de láminas variables —según los requerimientos del cultivo—, el fertirriego, la quimigación, la alta uniformidad de aplicación del agua —de ser operado de acuerdo con su diseño—, su fácil ensamblaje en el terreno y operación, y su adaptación para suplir las necesidades hídricas del cultivo por cada fase fenológica (Montero et al., 2013). Para evaluar la operación se debe estimar el coeficiente de uniformidad (CU) y la uniformidad de distribución (UD) (Baum et al., 2005; Zhang & Merkley, 2012). El CU de Heermann y Hein es una adaptación del coeficiente de Christiansen en la que cada pluviómetro cubre una corona circular de área, que se incrementa en la medida en que se aleja del punto pivotante; este parámetro evalúa el desempeño de los emisores en operación a una presión de diseño: un valor del CU inferior del 80 % no es apropiado; entre el 80 % y el 84 %, es regular; entre el 85 % y el 90 %, es óptimo, y mayor del 90 %, es muy bueno.



La UD se define así:

$$UD = 100(Z_{1q}/Z_{avg})$$

Donde:

UD: uniformidad de distribución (%)

Z_{1q} : lámina promedio (mm) infiltrada en el cuarto menor del área regada, o la cuarta parte del área con menor irrigación

Z_{avg} : lámina promedio (mm) infiltrada en el suelo

En el riego por aspersión, las láminas infiltradas se reemplazan por la pluviometría promedio, y para el caso de riego localizado, se emplean los caudales de los emisores. El CU se define así:

$$CU = 100(1 - \sum X_i / n m) \text{ como } X_i = |Z_i - m|$$

Donde:

CU: coeficiente de uniformidad (%)

Z_i : láminas de agua o caudales promedio (mm)

n: número de puntos evaluados

m: media de las láminas Z_i (mm)

En los sistemas de riego por aspersión, un valor permisible mínimo de UD de agua es del 80% (De la Cruz Tun Dzul et al., 2011); valores inferiores se pueden deber a un mal diseño del sistema de riego, lo cual limitaría su desempeño y apropiado funcionamiento (Buendía Espinoza et al., 2004).



Diseño, construcción, implementación y evaluación de un sistema de riego por pivote central para la producción de biomasa a gran escala (pastos y forrajes)

En este apartado se muestran las etapas de diseño, construcción, implementación y evaluación de la operación de un pivote central eléctrico para una superficie de 30,5 ha, para un riego de tasa variable (diferenciado), en cultivos de maíz, sorgo y pastos con seis sectores para la producción de biomasa a gran escala.

El sistema de riego diseñado debe garantizar las condiciones óptimas para el mejor aprovechamiento y consumo del agua de riego por parte de las plantas, lo cual es posible mediante su aplicación en cantidades necesarias, oportunas y homogéneas en el suelo, según los requerimientos hídricos del cultivo.

Diseño del sistema de riego por pivote central

El proceso consistió en realizar un diseño agronómico de acuerdo con los máximos requerimientos hídricos de los cultivos; seguidamente, se realizó el diseño hidráulico y se estableció la capacidad para la irrigación de 30,5 ha de cultivos forrajeros.

Para contar con un sistema de riego eficiente, se consideran cuidadosamente las relaciones agua-planta y agua-suelo. La implementación de los sistemas de riego se realiza en función de las láminas de aplicación de riego y del caudal disponible, y así se determinan las longitudes del pivote central.

Una de las alternativas para hacer frente a los problemas de sequía y déficit hídrico en los cultivos es la aplicación de riego, ya que este mantiene el cultivo estabilizado para mejorar su calidad y alcanzar mayores rendimientos, minimizando los efectos negativos ocasionados por el estrés hídrico. Por tanto, uno de los objetivos del presente proyecto de diseño de un sistema de riego por pivote central es aplicar la lámina de agua requerida por los cultivos de pasto, sorgo y maíz, para un área de 30,5 ha, en el C. I. Motilonia de AGROSAVIA, ubicado en el municipio de Agustín Codazzi, Cesar. Dicha lámina de agua requerida es conocida como el uso consuntivo y está dada en función de las condiciones climáticas, el tipo de cultivo y el sistema de riego por



aplicar. A continuación, se muestran los cálculos para la determinación del requerimiento hídrico del cultivo (uso consuntivo) en el C. I. Motilonia.

Evapotranspiración potencial: se estimó a partir de la información de la estación meteorológica del C. I. Motilonia, propiedad del Ideam (código 28025070), se encuentra ubicada en las coordenadas 10° 0' 6,5" N y 73° 14' 57,8" O. La estación está a 2.500 m de distancia del pivote central, por lo cual sus registros históricos, de hace aproximadamente cuarenta años, fueron representativos para la elaboración del proyecto.

Evapotranspiración de referencia (ET_o) por el método FAO Penman-Monteith: este método combina el balance energético con el método de transferencia de masas para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos como las horas de sol, la temperatura, la humedad atmosférica y la velocidad del viento (FAO, 2006).

Para poder usar la ecuación, se utilizó la estación meteorológica del C. I. Motilonia, perteneciente al Ideam, de la cual se tomaron los datos de temperatura (máxima y mínima), humedad relativa (máxima y mínima), velocidad del viento y brillo solar.

El método FAO Penman-Monteith para estimar la ET_o es el siguiente:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

ET_o: evapotranspiración de referencia (mm/día)

R_n: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m²/día)

G: flujo del calor de suelo (MJ/m²/día)

T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u₂: velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

e_s: presión de vapor de saturación (kPa)

e_a: presión real de vapor (kPa)

e_s - e_a: déficit de presión de vapor (kPa)

Δ: pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ: constante psicrométrica (kPa/°C)



La ecuación utiliza los datos climáticos mencionados. Para asegurar la precisión del cálculo, los datos climáticos deben ser medidos o convertidos a 2 m de altura, sobre una superficie extensa de pasto verde, cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua. Los resultados de la ETo de la zona de estudio se muestran en la figura 2.3. Para el cálculo del requerimiento hídrico de los cultivos priorizados, se tomará la ETo más crítica del año, correspondiente al mes de febrero: 6,547 mm/día.

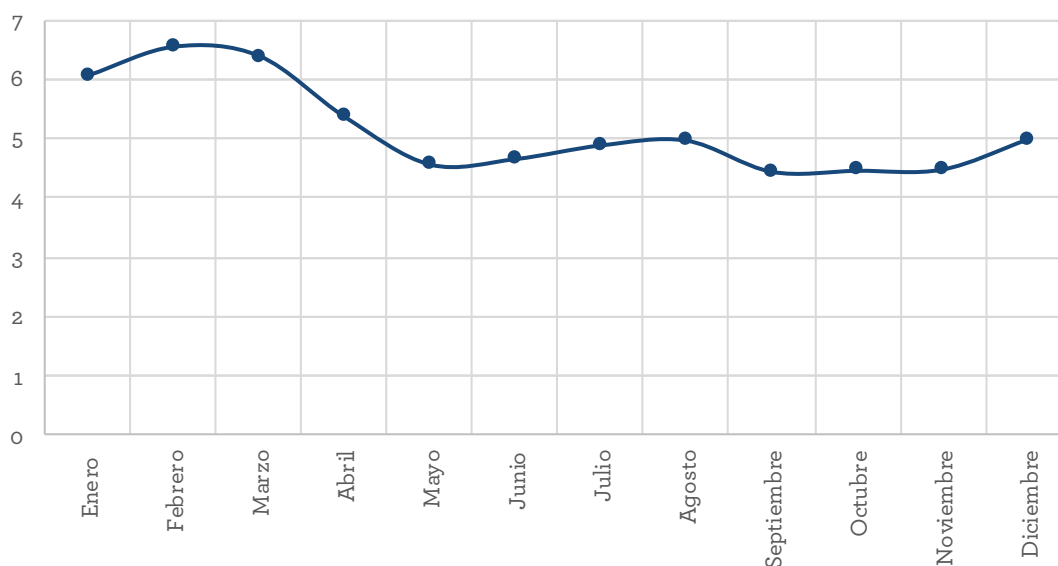


Figura 2.3. ETo (mm/día) del área de investigación.

Fuente: Elaboración propia

Requerimiento hídrico del cultivo

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc) exige el conocimiento de varios parámetros climáticos y propios de la superficie de evaporación para poder estimar las resistencias aerodinámicas y de superficie. Sin embargo, estos parámetros de la cubierta varían de un cultivo a otro y, para un mismo cultivo, dependen de su crecimiento y de su estado o etapa en el ciclo agronómico, aspectos que, a su vez, están condicionados por las prácticas culturales.

La evapotranspiración de un cultivo en condiciones estándar (mm/día) corresponde a la cubierta vegetal de un cultivo sano, sin estrés hídrico, en una superficie grande, donde se obtienen máximos rendimientos bajo unas condiciones climáticas específicas. La



ET_c, denominada como evapotranspiración máxima (ET_m; mm/día) de un cultivo, se estima como el producto de la E_{to} (mm/día) por el coeficiente de cultivo (K_c, adimensional) (Doorenbos & Pruitt, 1975):

$$ET_c = K_c \times E_{To}$$

El K_c tiene en cuenta los efectos de cuatro parámetros que lo diferencian del cultivo de referencia:

- La altura de cultivo (h), la cual está relacionada con la rugosidad y la resistencia aerodinámica.
- El albedo de la cubierta está en función de la fracción de la cobertura vegetal; este parámetro se relaciona con la radiación solar absorbida y representa la radiación neta absorbida por la cubierta.
- El área foliar, la densidad estomática, su edad y su estado, así como el nivel de control estomático, ya que promueven la resistencia al flujo de vapor de agua de la cobertura vegetal; es así como se afecta la resistencia de la superficie.
- La superficie de suelo desnudo, que está en función de la fracción de cobertura vegetal y que incide en la evaporación desde el suelo.

El valor de K_c cambia según el ciclo fenológico a medida que la cubierta vegetal incrementa y el cultivo se desarrolla; de igual forma, cambia la cobertura del área vegetativa del suelo hasta alcanzar la senescencia de la planta. Por lo anterior, se ha optado por calcular la variación de los valores de K_c durante el ciclo del cultivo a través del cambio del índice de área foliar (IAF) efectivo, dado que la transpiración de un cultivo cambia, según su ciclo de crecimiento y desarrollo, de forma paralela a su IAF. Sin embargo, un aspecto relevante de la variación del K_c respecto al cultivo es el efecto adicional del suelo desnudo, principalmente cuando el porcentaje del suelo es mayor, situación que se da en las primeras etapas fenológicas de los cultivos.

Según la FAO, el K_c combina las características de un cultivo específico y los efectos promedio de la evaporación del suelo, así como de su etapa fenológica, para lo cual, para efectos de diseño, debe tomarse el K_c más crítico, que normalmente es el K_c medio, correspondiente a la etapa en que el cultivo presenta un mayor follaje y, por lo tanto, una mayor transpiración de la planta. Los valores de K_c (tabla 2.1) se estiman a partir de estudios que utilizan lisímetros de pesada instalados en áreas representativas de cultivos con prácticas culturales apropiadas y uniformes.



Tabla 2.1. K_c medios para diversos cultivos

Cultivo	K_c inicial	K_c medio	K_c final
Pastos de pastoreo/pastos de rotación	0,3	0,8-1,0	0,8
Pastos de pastoreo extensivo	0,3	0,7	0,7
Maíz para grano	0,15	1,15	0,15
Maíz dulce		1,1	1
Sorgo para grano		0,95-1,05	0,35
Sorgo dulce		1,15	1

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2006)

Para el dimensionamiento del sistema de riego por pivote central para los cultivos de maíz, sorgo y pastos, se consideró un K_c crítico de 1,15, correspondiente al cultivo de sorgo (tabla 2.1), por ser el más alto entre los tres cultivos, con el fin de satisfacer el requerimiento hídrico más alto en periodos de picos de evapotranspiración.

Capacidad del sistema por pivote central

La capacidad del sistema es el criterio de diseño más importante para los pivotes. Muchos sistemas son diseñados para minimizar los costos y no son capaces de satisfacer los picos de requerimientos de agua del cultivo, razón principal por la cual se adopta la tecnología. La capacidad del sistema de un pivote central es la velocidad a la que se puede suministrar el agua a la superficie regada, normalmente expresada en mm/día (típicamente está entre 8 y 20 mm/día).

Para determinar la capacidad adecuada del sistema, se debe considerar lo siguiente:

- Eficiencia de la aplicación (EA; %): es la proporción de agua aplicada que el cultivo puede utilizar; para el pivote central, se encuentra cerca del 90 %.
- Tiempo de riego (horas): es el coeficiente de funcionamiento del bombeo (CFB). Es la proporción de tiempo que la máquina tiene que operar para abastecer los picos de las necesidades de agua de los cultivos. Un funcionamiento continuo durante muchos días no es recomendable, pues se podrían presentar algunas averías o cortes de energía. El máximo recomendado de CFB es de 0,85, lo que equivale a un funcionamiento de 6 días por semana o 20 horas por día. En general, cuando el uso de agua por parte del cultivo es menor que el requisito de pico, se necesitan tiempos de operación más cortos.



- Pico de evapotranspiración (mm/día): es la tasa más alta de consumo de agua de los cultivos; en este caso, es igual a 8,72 mm/día.
- Velocidad de infiltración en el suelo (mm/h): es la velocidad con la cual el agua penetra en el suelo. Generalmente, se mide con base en la profundidad (en mm) que la lámina de agua logra penetrar en el suelo en una hora. Es necesario instalar emisores con tasas de aplicación que no superen los 30 mm/h, considerando que predominan suelos de textura franco-arenosa y teniendo en cuenta las preparaciones previas que se le realiza al suelo para el establecimiento de los cultivos (velocidad de infiltración en el suelo del C. I. Motilonia).

Para la determinación del requerimiento de agua del cultivo bajo el sistema de pivote central, se consideraron la eficiencia del sistema de riego y el porcentaje de humedecimiento, de la siguiente manera:

$$RAC = \frac{ET_o \times K_c \times \%A}{n}$$

$$RAC = \frac{6,54 \text{ mm/día} * 1,2 * 1}{0,9} = 8,72 \text{ mm/día}$$

Donde:

RAC: requerimiento de agua del cultivo

ET_o: evapotranspiración potencial

K_c: coeficiente del cultivo

n: eficiencia de riego (90 % en el caso del pivote central)

%A: factor de humedecimiento (100 % en el caso del sistema de riego por pivote central)

Entonces, el volumen de agua de riego requerido por el pivote central para regar un área de 30,5 hectáreas para los cultivos de sorgo, maíz y pasto es el siguiente:

$$\text{Volumen por hectarea por día} = 87,2 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total} = 2.663,96 \text{ m}^3/\text{día}$$

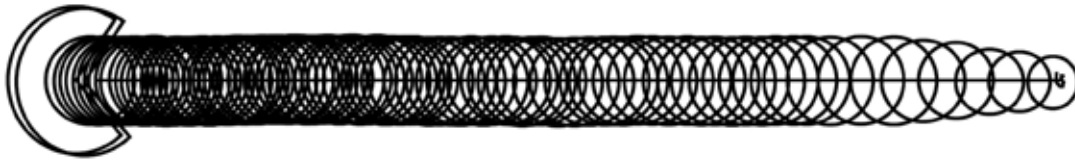


De acuerdo con los caudales máximos permitidos de los pozos por parte de la Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar), se consideró un tiempo máximo de jornada de 21,24 horas/día para el funcionamiento del pivote, con lo que se cumplía la capacidad máxima del pozo y se contaba con la posibilidad de incrementar la lámina hasta un 15 %, llegando a 10 mm/día; asimismo, las 2,6 horas de receso permitían realizar un mantenimiento al equipo sin afectar el normal funcionamiento del riego por pivote, con un caudal del sistema (CS) de 34,53 L/s.

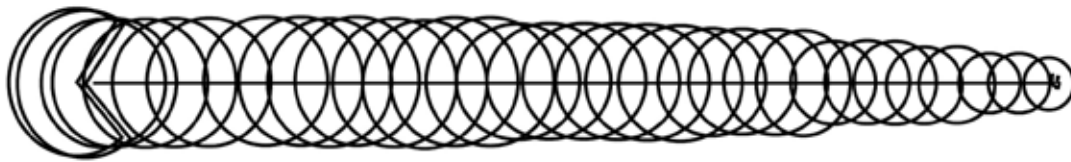
$$CS = \frac{2.663,96 \text{ m}^3/\text{día}}{21,42 \text{ h}} = 124,32 \text{ m}^3/\text{h} = 34,53 \text{ L/s}$$

Selección de emisores y uniformidad de riego

A los sistemas de riego por pivote se les adaptan aspersores rotativos o aspersores difusores. Dado que el movimiento del lateral pivotante describe una circunferencia, los aspersores próximos al punto pivotante riegan un área circular de menor superficie que aquellos ubicados cerca al extremo. Para alcanzar una distribución uniforme en el riego, la pluviometría debe incrementarse a medida que se avanza hacia el extremo exterior. Para tal fin, se puede disminuir el espaciamiento entre los aspersores (figura 2.4a) o incrementar el tamaño de las boquillas (figura 2.4b) (o las dos opciones al tiempo). El espaciamiento variable emplea el mismo tipo de aspersores en gran parte del lateral, por lo que se tiene la ventaja de que su mantenimiento es más fácil. El espaciamiento constante, por su parte, implica aumentar el tamaño de los aspersores y de las boquillas a medida que se alejan del punto pivotante; esta variante se utiliza con difusores (Santos et al., 2010). Es opcional el colocar un cañón o aspersor de largo alcance de riego al final de la tubería, el cual permite ampliar el área irrigada.



a.



b.

Figura 2.4. Distribución del agua con cañón externo. a. Aspersores con espaciamiento variable; b. Aspersores con espaciamiento uniforme.

Fuente: Elaboración propia

La pluviometría del sistema de riego y el caudal de descarga incrementan a medida que los aspersores o difusores se alejan del punto pivotante, al tener que regar una superficie circular de mayor área en el mismo tiempo por revolución. Inicialmente, se plantea la ecuación de área de una circunferencia; esta área es la sección a la cual se le calcula la cantidad de agua por aplicar (lámina de riego).

$$A = \pi r^2$$

Donde:

A: área

r: radio

El área de influencia (corona circular) de cada aspersor del pivote central se determina de la siguiente manera:

$$A_i = \pi(R^2 - r^2)$$

$$R = Pos + D/2$$

$$r = Pos - D/2$$



Donde:

Ai: área de influencia del aspersor (m²)

R: radio externo de la corona circular (m)

r: radio interno de la corona circular (m)

Pos: posición del aspersor desde la torre central

D: distancia entre aspersores

Asimismo, se determina el caudal correspondiente al área de influencia de cada aspersor, teniendo en cuenta el área y el caudal total del pivote central, de la siguiente manera:

$$q = \frac{QT}{AT} Ai$$

Donde:

q: caudal

QT: caudal total (m³/h)

AT: área total (m²)

Ai: área de influencia del aspersor (m²)

La selección de los aspersores se realiza de acuerdo con la tabla de boquillas de riego (tabla 2.2), la cual es un elemento esencial para el riego por pivotes. Para este diseño, se trabajó con los aspersores tipo I-Wob UP3 de Senninger, con una presión de trabajo equivalente a 10 psi.

Una vez calculado el caudal para cada aspersor, se selecciona la boquilla que mejor se ajuste al caudal estimado para la presión de operación del aspersor. Luego, se suman los caudales de los emisores y se confrontan con el caudal total disponible. De ser necesario, se corrige el cálculo y se ajusta.



Tabla 2.2. Características de las boquillas de riego

Color y número de la boquilla	Tamaño de la boquilla	10 psi (0,69 bar)		15 psi (1,03 bar)	
		gpm	(L/h)	gpm	(L/h)
# 2 rosado	1/32" (0,031) 0,79 mm	0,09	20	0,11	25
# 2,5	5/128" (0,039) 0,99 mm	0,14	32	0,17	39
# 3 hielo	3/64" (0,047) 1,19 mm	0,20	45	0,24	55
# 3,5	7/128" (0,055) 1,40 mm	0,27	61	0,33	75
# 4 azul claro	1/16" (0,063) 1,59 mm	0,35	79	0,43	98
# 4,5	9/128" (0,070) 1,78 mm	0,45	102	0,55	125
# 5 beige	5/64" (0,078) 1,98 mm	0,55	125	0,68	154
# 5,5	11/128" (0,085) 2,16 mm	0,67	152	0,82	186
# 6 dorado	3/32" (0,094) 2,38 mm	0,80	182	0,98	223
# 6,5	13/128" (0,102) 2,59 mm	0,94	213	1,15	261
# 7 lima	7/64" (0,109) 2,78 mm	1,09	248	1,34	304
# 7,5	15/128" (0,117) 2,97 mm	1,26	286	1,54	350
# 8 lavanda	1/8" (0,125) 3,18 mm	1,43	325	1,75	397
# 8,5	17/128" (0,133) 3,38 mm	1,62	368	1,98	450
# 9 gris	9/64" (0,141) 3,57 mm	1,81	411	2,22	504
# 9,5	19/128" (0,148) 3,76 mm	2,02	459	2,48	563
# 10 turquesa	5/32" (0,156) 3,97 mm	2,24	509	2,75	625
# 10,5	21/128" (0,164) 4,17 mm	2,47	561	3,03	688
# 11 amarillo	11/64" (0,172) 4,37 mm	2,72	618	3,33	756
# 11,5	23/128" (0,180) 4,57 mm	2,97	675	3,64	827
# 12 rojo	3/16" (0,188) 4,76 mm	3,24	736	3,97	902
# 12,5	25/128" (0,195) 4,95 mm	3,52	799	4,31	979
# 13 blanco	13/64" (0,203) 5,16 mm	3,81	865	4,66	1.058
# 13,5	27/128" (0,211) 5,36 mm	4,11	933	5,03	1.142
# 14 azul	7/32" (0,219) 5,56 mm	4,42	1.004	5,41	1.229
# 14,5	29/128" (0,227) 5,77 mm	4,74	1.077	5,81	1.320
# 15 marrón oscuro	15/64" (0,231) 5,95 mm	5,08	1.154	6,22	1.413
# 15,5	31/128" (0,242) 6,15 mm	5,42	1.231	6,64	1.508
# 16 naranja	1/4" (0,250) 6,35 mm	5,78	1.313	7,08	1.608
# 16,5	33/128" (0,258) 6,55 mm	6,15	1.397	7,53	1.710
# 17 verde oscuro	17/64" (0,266) 6,75 mm	6,53	1.483	7,99	1.815
# 17,5	35/128" (0,273) 6,93 mm	6,92	1.572	8,47	1.924
# 18 púrpura	9/32" (0,281) 7,14 mm	7,32	1.663	8,96	2.035
# 18,5	37/128" (0,289) 7,34 mm	7,73	1.756	9,47	2.151

Fuente: Senninger (s.f.)



Tasa de aplicación

La pluviometría de los aspersores en operación se llama “tasa de aplicación”, se mide en mm/h y es una característica del aspersor y del espaciamiento entre estos. En un pivote central, aumenta con las mayores demandas de caudal requeridas en el extremo del pivote. Un análisis de diferentes opciones de aspersores arrojó que un mayor alcance proporciona una pluviometría más baja. La tasa de aplicación del área de influencia de cada aspersor debe ser igual a la tasa de aplicación del área total:

$$T_a = \frac{Q}{AT} = \frac{124,3}{30.690} * 1.000 = 4,05 \text{ mm/h}$$

Donde:

Ta: tasa de aplicación (mm/h)

Q: caudal total (m³/h)

AT: área total (m²)

De acuerdo con los requerimientos hídricos determinados anteriormente, se consideran las siguientes especificaciones y capacidad del sistema de pivote central (tabla 2.3).

Tabla 2.3. Especificaciones y capacidad del sistema de pivote central

Operación	
Descripción	Valor
Lámina diaria bruta (mm)	8,72
Tiempo de operación (h)	21,42
Velocidad de operación (m/h)	311
Lámina al 100 % de la velocidad	2,33 mm en 5,5 h
Salida del pivote (m ³ /h)	124,32
Radio total regado (m)	312,56
Área regada (ha)	30,69
Número de tramos	6
Número de voladizos	1

Fuente: Elaboración propia



Diseño general del pivote central

El pivote central tiene 6 tramos de 48 m cada uno, y un voladizo de 24 m, sin cañón, en los cuales hay 116 aspersores para suministrar la lámina de riego requerida (figura 2.5).

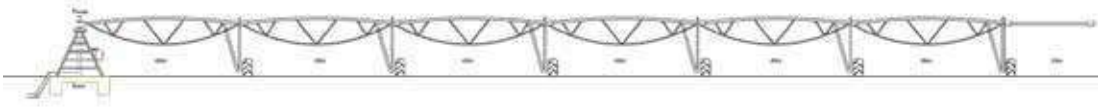


Figura 2.5. Diseño del pivote central.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2.4 se muestran las dimensiones del pivote central en cuanto a longitud de las torres (tramos), áreas regadas y número de aspersores. Los aspersores están separados entre sí a 4,56 m en el primer tramo; en el tramo intermedio, su separación se reduce, gradualmente, a 2,28 m, y, finalmente, en el voladizo, la separación es de 2 m entre aspersores. Esta separación se debe a que el área de cubrimiento no es la misma en todos los casos, y la reducción gradual de la separación hace que la uniformidad sea del 95 %.

Tabla 2.4. Descripción general del sistema de pivote central

Tramo	1	2	3	4	5	6	Voladizo	Cañón
Longitud (m)	48,75	47,96	47,96	47,96	47,96	47,96	24	0
Distancia desde el punto central (m)	48,75	96,71	144,67	192,63	240,59	288,55	312,55	312,55
Área regada (ha)	0,75	2,94	6,58	11,66	18,18	26,16	30,69	30,69
Área regada (%)	2	10	21	38	59	85	100	100
Aspersor	I-Wob	I-Wob	I-Wob	I-Wob	I-Wob	I-Wob	I-Wob	—
Regulador	10 psi	10 psi	10 psi	10 psi	10 psi	10 psi	10 psi	—
Salidas	10	10	21	21	21	21	12	—

Fuente: Elaboración propia

Características del tipo de aspersor seleccionado

La característica más importante del pivote central es su capacidad de aplicar el agua de manera uniforme (superior al 90 %); dicho procedimiento es posible a partir de los



emisores instalados a lo largo de la tubería principal del pivote. Para el sistema de riego del estudio se estableció un total de 116 aspersores I-Wob, de Senninger, diseñados específicamente para pivotes (figura 2.6).



Figura 2.6. Diseño del aspersor I-Wob.

Foto: Guillermo Alberto Brochero Aldana

Automatización y control

En los últimos años, el sistema de riego por pivote central ha presentado avances significativos en cuanto a una mayor eficiencia en la aplicación del riego, así como la posibilidad de monitorear remotamente las máquinas desde dispositivos móviles; esto incluye el monitoreo de la humedad del suelo con sensores *in situ*, con el propósito de definir las láminas de aplicación de riego con tasas variables de agua a largo del pivote, incursionando en la agricultura de precisión. Mediante las tecnologías de sistemas de posicionamiento global (GPS) y sistemas de información geográfica (SIG), se calculan las láminas de riego para aplicar de forma sectorizada, y los datos son enviados a un panel de control central de fácil uso, que permite hacer el monitoreo.



El sistema instalado en el C. I. Motilonia cuenta con las siguientes características:

- Control de aplicación de porcentaje
- Control de aplicación en mm
- *Autostop*/autorreverso
- Inicio e interrupción en agua y en seco
- Aplicación de tasa variable
- Automatización con un sistema que le permite al usuario tener el control remoto completo de su equipo, desde su computadora o dispositivo móvil conectado a internet
- Riego sectorizado (6 sectores; figura 2.7)
- Programación en horario simple
- Programación paso a paso según la fecha y la hora
- Reinicio automático al restablecer la energía
- Control de dirección
- Lectura de presión
- Cálculo de las horas por revolución

Balance hídrico y programación de riego

La metodología presentada por Evett et al. (2012) fue implementada en este trabajo para la estimación del balance hídrico. La ET_c fue calculada directamente con el balance de masa, utilizando la ecuación de balance agua-suelo:

$$ET_c = I + P - F - R \pm \Delta S$$

Donde:

I: irrigación

P: precipitación

F: flujo hacia (tomado como positivo) o fuera (tomado como negativo) del volumen de control, considerado aquí como el volumen de drenaje

R: suma de escurrimiento

ΔS : cambio en el agua del suelo almacenada en el volumen de control de 1 m^3

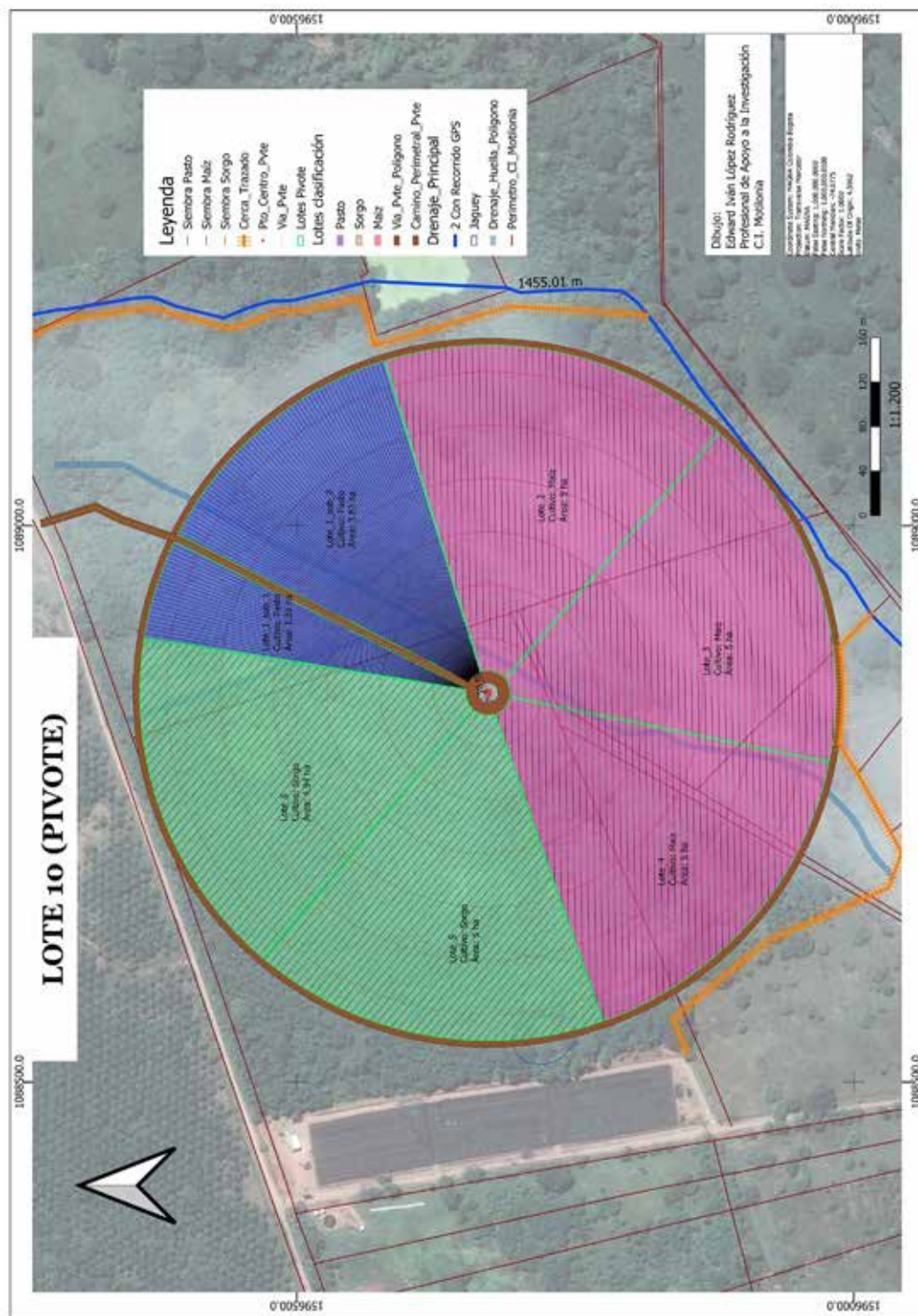


Figura 2.7. Tasa de riego variable (riego sectorizado) en el pivote.

Fuente: Elaboración propia



Se utilizó el *software* Cropwat para planificar los horarios de riego y las láminas brutas para aplicar en los tres cultivos. El modelo estima los requerimientos hídricos del cultivo (RAC) y la distribución óptima del agua, lo que da como resultado el mayor rendimiento posible en condiciones de agua limitada, para un clima, cultivo y campo determinados. Cropwat muestra las consecuencias en el programa de riego, en términos de eficiencia de aplicación del agua y respuesta de rendimiento esperada. Cropwat es una herramienta fiable para comprender los RAC y la planificación del riego, así como para gestionar su programación (Luo et al., 2015). Los principales valores de entrada necesarios para Cropwat son los datos de los cultivos (fecha de siembra del cultivo, valores de K_c en las diferentes etapas de crecimiento y duración de las etapas de crecimiento), los datos del suelo (contenido de agua total disponible, máxima profundidad radicular, tasa máxima de infiltración de lluvia, agotamiento de la humedad en suelo y humedad inicial del suelo disponible) y los datos climáticos (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y horas de sol). Este programa de computación es muy útil, ya que puede ser empleado para realizar programaciones de riego en diferentes cultivos, con base fundamentalmente en los RAC, según su etapa fisiológica, a partir de los datos climáticos históricos de la zona y de los datos del suelo.

A continuación, se muestran los diferentes eventos de riego, su duración, las láminas y el volumen de agua aplicados y el rendimiento para cada cultivo (tabla 2.5).

Tabla 2.5. Láminas de agua aprovechadas por los cultivos y rendimientos

Sector	Ciclo (corte)	Inicio de riego	Fin de riego	Duración (días)	Precipitación estimada en Cropwat (mm)	Precipitación real (mm)	Lámina bruta estimada en Cropwat (mm)	Lámina bruta aplicada (mm)	Tiempo de riego (h/ha)	Volumen de agua de riego aplicado (m ³ /ha)	Producción de heno (pasto) o de forraje verde (sorgo o maíz) (t/ha)
Cultivo de pasto											
S1	C1	13/01/2021	12/04/2021	89	160,0	105	422,2	401,90	31,3	4.019	3,5
S1	C2	13/04/2021	16/06/2021	64	338,2	439	67,4	16,31	1,2	163,1	3,7
S1	C3	17/06/2021	9/08/2021	53	137,1	288	162,5	68,42	5,2	681,2	3,3
S1	C4	10/08/2021	10/12/2021	122	280,8	909	214,3	8	0,6	80	4,1
Cultivo de sorgo											
S2	C1	27/01/2021	19/05/2021	112	325,0	284	502,4	269,10	20,6	2.691	12,1
S3	C1	18/01/2021	6/05/2021	108	261,4	181	513,8	344,90	26,5	3.449	31,6
S5	C1	1/08/2022	3/11/2022	94	626,8	842	285,9	49,98	3,8	499,8	33,5
S6	C1	4/08/2022	16/11/2022	104	618,9	954	286,8	33,98	2,5	339,8	24,3
Cultivo de maíz											
S2	C1	8/07/2021	20/09/2021	74	340,0	732	267,3	123,46	9,5	1.234,6	30
S2	C2	24/11/2021	7/02/2022	75	113,4	92	300,8	265,73	21,3	2.656,6	36
S2	C3	13/06/2022	4/09/2022	83	315,8	317	518,8	69,64	5,1	696,36	28
S3	C1	30/06/2021	12/10/2021	104	316,8	734	270,0	124,73	9,7	1.249,3	24,4
S3	C2	12/10/2021	25/12/2021	74	420,2	315	242,3	133,33	10,5	1.330,6	24,5
S3	C3	16/06/2022	4/09/2022	80	321,6	617	270,8	70,28	5,2	703,1	22,4
S4	C1	6/07/2022	4/10/2022	90	358,8	575	264,2	65,25	5,0	653,1	27,7

Fuente: Elaboración propia





Evaluación de la producción y las láminas de riego aplicadas

Para cada ciclo productivo de los forrajes se estimaron el agua total aplicada y la producción de biomasa en distintas épocas y en diferentes sectores dentro del área irrigada, excepto en el caso del pasto, que se mantuvo establecido en el mismo sector; lo anterior, con el fin de determinar la productividad hídrica.

Productividad hídrica (WP)

La productividad es un indicador fundamental en el manejo y uso eficiente del recurso hídrico y su planificación a largo plazo (Zwart & Bastiaanssen, 2004); además, se puede generar ahorro en algunos sistemas que presentan consumos de agua excesivos. La productividad se puede estimar como kilos producidos por gota, concepto que permite comparar la productividad del agua en distintos escenarios y otros usos posibles del recurso hídrico (FAO, 2003).

La productividad del agua (WP) se define como la cosecha física o económica por unidad de agua consumida por el cultivo (en kg/m³ u otro peso/m³). El numerador puede ser expresado en términos de rendimiento de grano (kg/ha) o en términos económicos (peso/ha), mientras que en el denominador pueden usarse la transpiración, la evapotranspiración, el agua aplicada o el agua aplicada más la lluvia, entre otros, según Molden (1997). En este trabajo, usaremos la siguiente definición de WP:

$$WP \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{R}{I + P_{ef}}$$

Donde:

R: rendimiento (kg/ha)

I: agua aplicada por riego

P_{ef}: precipitación efectiva

La WP muestra considerables variaciones entre cultivos. Esta variabilidad ocurre porque los datos son recolectados en diferentes ambientes y en distintos tipos de manejo del cultivo, todo lo cual afecta no solo el rendimiento, sino también la cantidad de agua aplicada (Kijne et al., 2003).



La WP de los cultivos en los diferentes sectores es afectada por la calidad del suelo presente en cada sector. Es importante tener en cuenta que el área total del pivote (30,5 ha) presenta una variabilidad espacial en el pH del suelo (figura 1.2, capítulo I). En las figuras 2.8, 2.10 y 2.11, los S1 (color verde claro) y S6 (color morado) corresponden a sectores con predominio de la reacción alcalina, los S2 y S4 (color azul rey) corresponden a suelos en los que predomina un pH moderadamente alcalino y los S3 y S5 (color azul claro) representan un sector que es de neutro a moderadamente ácido. Se observó que para $\text{pH} > 7,8$, la WP fluctúa entre 0,5 y 0,8, mientras que para $\text{pH} < 7,8$ la WP supera el valor de 2,8 en un ciclo de 32 días; luego los valores obtenidos son consistentes, pues más del 90 % del área presenta un $\text{pH} > 7,8$.

Para el cultivo de pasto Agrosavia Sabanera sembrado en el sector 1 (tabla 2.5), se realizaron cuatro cortes sucesivos, a los 89, 153, 206 y 328 días (C1, C2, C3 y C4, respectivamente). Se observa que la WP de los cuatro cortes (figura 2.8) varía entre 0,5 y 0,9 kg/m^3 , con una mayor productividad en el corte C3 y la más baja en el corte C4. El primer corte corresponde al establecimiento del pasto, mientras que los cortes C2 y C3, con duraciones más cortas, mostraron una mayor WP. Cabe resaltar que, debido a los eventos lluviosos, no fue posible cortar el pasto en la etapa de mayor crecimiento y calidad del forraje, lo cual sucede entre los 28 y 49 días. En el caso del corte C4, los aportes de la precipitación y el riego fueron de 909 mm en 122 días, lo cual afectó de manera negativa la WP, debido a una disminución de la materia seca a partir de los 35 días. Se observa que la WP del pasto está inversamente relacionada con el número de días por ciclo (figura 2.8), por lo cual se recomienda realizar cortes en una edad joven, inferior a los 50 días.

Para el cultivo de sorgo dulce forrajero Corpoica JJT-18 (*Sorghum bicolor* L.), sembrado en los sectores S2, S3, S5 y S6 (tabla 2.5), se observó que las mayores WP se encuentran en los sectores S3-C1 y S5-C1 (suelos con pH de neutro a moderadamente ácido), con valores de 6 kg/m^3 y 3,8 kg/m^3 , respectivamente (figura 2.10). Se observa que la WP del sorgo en el S2-C1 es relativamente baja (2,2 kg/m^3) por haber sido cultivado en un suelo de menor calidad. Cabe resaltar que el cultivo presentó, durante su fase de crecimiento, una buena cobertura y un buen desarrollo; sin embargo, el rendimiento fue afectado en el S2 por eventos lluviosos con fuertes vientos, por lo cual el material se volcó y fue poco lo que se logró cosechar. Para S6-C1, la producción de biomasa fue marginal, con 24,3 t/ha, y la WP fue de 2,5 kg/m^3 . Este resultado se explica por la baja calidad del suelo, con un pH alcalino y un porcentaje de sodio intercambiable que tiende a aumentar, con lo que afecta el desarrollo de las plantas.

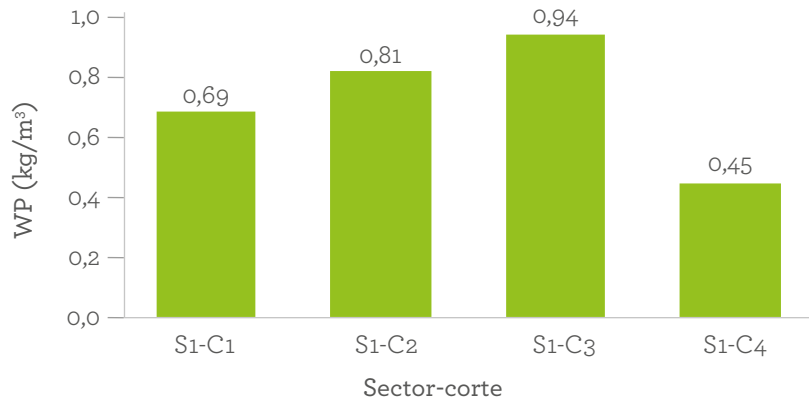


Figura 2.8. WP en los cuatro cortes del sector 1 (S1) para el cultivo de pasto Agrosavia Sabanera bajo el sistema de riego por pivote central.

Fuente: Elaboración propia

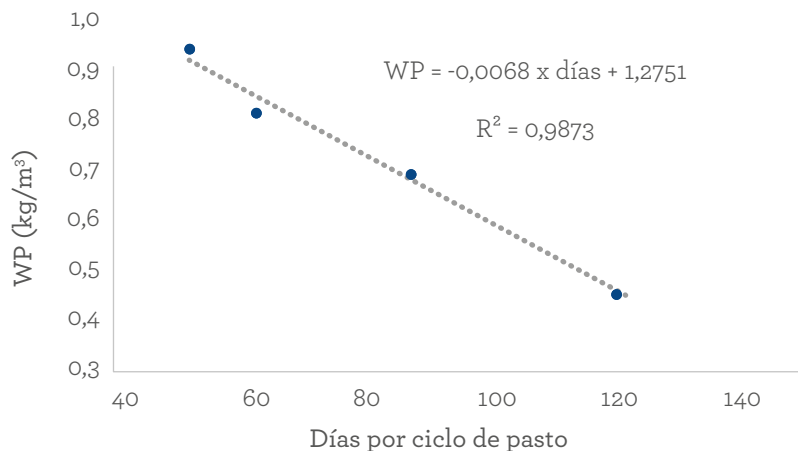


Figura 2.9. Correlación entre la WP y los días por ciclo de pasto.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al cultivo de maíz, con el híbrido Pioneer 30F35 sembrado en los sectores S2, S3 y S4 (tabla 2.5), el S2-C2 presentó la mayor producción de biomasa y la mayor WP, con valores de 36 t/ha y 10,1 kg/m³, respectivamente (figura 2.11). Cabe mencionar que gran parte del agua requerida por el cultivo durante este corte fue suministrada mediante el riego debido a las pocas precipitaciones, por lo cual el cultivo no se sometió a condiciones de anegamiento por altas intensidades de lluvia, lo cual fue favorable en el establecimiento del cultivo y en la cosecha, teniendo en cuenta



que la calidad del suelo es marginal en este sector y el comportamiento del material sobresalió durante la época seca. En este mismo sector, durante el C1, se presentaron épocas lluviosas (un total de 732 mm en 74 días), las cuales afectaron de forma desfavorable en el momento de establecimiento del cultivo, teniendo en cuenta que el suelo con presencia de sodio tiende a estar anegado por más tiempo, condiciones poco favorables para el maíz. Con respecto al S2-C3, el aporte de riego fue deficitario por fallas en el sistema de riego, lo que explica la diferencia en la WP con respecto al C2. Pedroza Sandoval et al. (2014) reportan una WP en maíz de 5,7 kg/m³, valor cercano al promedio encontrado en condiciones del Caribe colombiano en suelos de variable calidad. En el S3 se observó el mismo comportamiento en cuanto a la WP, con un pico en el C2, con valores menores al S2. Con respecto al S4-C1, la producción de forraje verde fue de 27 t/ha y la WP fue de 4,3 kg/m³, valores normales teniendo en cuenta que gran parte de este suelo es de reacción alcalina, con moderadas limitaciones para el desarrollo de los cultivos.

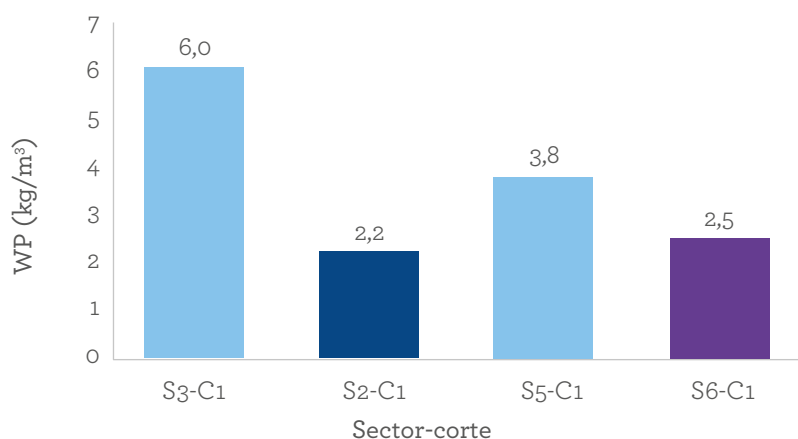


Figura 2.10. WP por sector (S) y por corte (C) para el cultivo de sorgo dulce forrajero Corpoica JJT-18 bajo el sistema de riego por pivote central.

Fuente: Elaboración propia

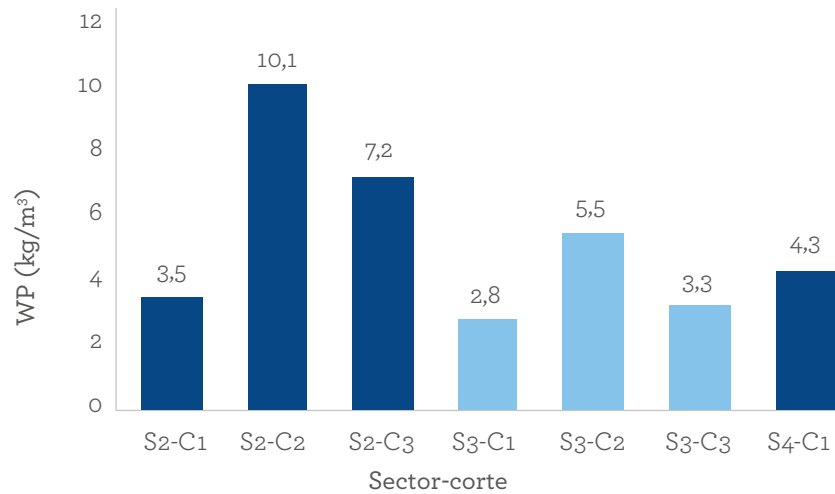


Figura 2.11. WP por sector (S) y por corte (C) para el cultivo de maíz Pioneer 30F35 bajo el sistema de riego por pivote central.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

En este capítulo se diseñó, implementó y evaluó la operación de un pivote central eléctrico de una superficie de 30,5 ha, para un riego de tasa variable (diferenciado), para cultivos de maíz, sorgo y pastos, con seis sectores, para la producción de biomasa a gran escala. La WP de los tres cultivos bajo el sistema de riego por pivote central representa un elemento clave en la planeación estratégica de los recursos hídricos a largo plazo. El manejo del agua basado en parámetros de productividad puede mejorar su uso y contribuir a su ahorro en aquellos sistemas que consumen cantidades excesivas de agua. Se recomienda realizar un adecuado dimensionamiento del sistema y determinar la mejor programación de riego para cada cultivo, con el fin de garantizar las condiciones óptimas para el mejor aprovechamiento y consumo del agua de riego por parte de la planta, lo cual fue posible mediante la aplicación de cantidades necesarias, oportunas y homogéneas en el suelo, con base en los requerimientos hídricos del cultivo.



Referencias

- Allen, R. G. (1998). *CATCH3D: Sprinkler overlap program*. Utah State University.
- Allen, R. G., Keller, J., & Martin, D. (2000). *Center pivot system design*. The Irrigation Association.
- Baum, M. C., Dukes, M. D., & Miller, G. L. (2005). Analysis of residential irrigation distribution uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(4), 336-341. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:4\(336\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:4(336))
- Benjamin, J. G., Havis, H. R., Ahuja, L. R., & Alonso, C. V. (1994). Leaching and water flow patterns in every-furrow and alternate-furrow irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1511-1517. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050034x>
- Buendía Espinoza, J. C., Palacios Vélez, E., Chávez Morales, J., & Rojas Martínez, B. (2004). Impacto del funcionamiento de los sistemas de riego presurizados en la productividad de ocho cultivos, en Guanajuato, México. *Agrociencia*, 38(5), 477-486. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30238501>
- Castro Popoca, M., Águila Marín, F. M., Quevedo Nolasco, A., Kleisinger, S., Tijerina Chávez, L., & Mejía Sáenz, E. (2008). Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agricultura Técnica en México*, 34(4), 459-470. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172008000400009
- Cisneros, E., González, Á., García, A., Placeres, Z., & Jiménez, E. (2014). Evaluación y propuesta de medidas en diferentes técnicas de riego por aspersión para un uso eficiente del agua. *Revista Ingeniería Agrícola*, 4(1), 22-28. <https://www.redalyc.org/pdf/5862/586262039005.pdf>
- De la Cruz Tun Dzul, J., Ramírez Jaramillo, G., Sánchez Cohen, I., Lomas Barrié, C. T., & Cano González, A. de J. (2011). Diagnóstico y evaluación de sistemas de riego en el Distrito 048 Ticul, Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(número especial), 5-18. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000700001
- DeBoer, D. W., Monnens, M. J., & Kincaid, D. C. (2000). Rotating-plate sprinkler spacing on continuous-move irrigation laterals. En R. G. Evans, B. L. Benham, & T. P. Trooien (Eds.), *Proceedings of the 4th Decennial Symposium* (pp. 115-122). American Society of Agricultural Engineers (ASAE).
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1975). Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper*, (24). <https://www.nrc.gov/docs/ML1821/ML18215A282.pdf>
- Evans, R. G., & King, B. A. (2012). Site-specific sprinkler irrigation in a water-limited future. *Transactions of the ASABE*, 55(2), 493-504. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=41382>



- Evett, S. R., Schwartz, R. C., Casanova, J. J., & Heng, L. K. (2012). Soil water sensing for water balance, ET and WUE. *Agricultural Water Management*, 104(6), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.002>
- Flores-Gallardo, H., Sifuentes-Ibarra, E., Flores-Magdaleno, H., Ojeda-Bustamante, W., & Ramos-García, C. R. (2014). Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(2), 241-252. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000200006
- Flórez-Tuta, N., Zution-Gonçalves, I., Feitosa, D. R.-C., Agnellos-Barbosa, E. A., Ponciano-de Deus, F., Diego-Ribeiro, M., & Eiji-Matsura, E. (2013). Eficiencia de aplicación de agua en la superficie y en el perfil del suelo en un sistema de riego por aspersión. *Agrociencia*, 47(2), 107-119. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952013000200001
- González-Camacho, J. M., Muñoz-Hernández, B., Acosta-Hernández, R., & Mailhol, J. C. (2006). Modelo de la onda cinemática adaptado al riego por surcos cerrados. *Agrociencia*, 40(6), 731-740. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30240605.pdf>
- Kijne, J. W., Barker, R., & Molden, D. (2003). *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement*. CABI. <https://doi.org/10.1079/9780851996691.0000>
- Kincaid, D. C., King, B. A., & DeBoer, D. W. (2000). Sprinkler packages and their configurations for center pivot irrigation. En *National Irrigation Symposium: Proceedings of the 4th Decennial Symposium* (pp. 109-114).
- Levy, D., Coleman, W. K., & Veilleux, R. E. (2013). Adaptation of potato to water shortage: Irrigation management and enhancement of tolerance to drought and salinity. *American Journal of Potato Research*, 90, 186-206. <https://doi.org/10.1007/s12230-012-9291-y>
- Louie, M. J., & Selker, J. S. (2000). Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(3), 142-148. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:3\(142\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:3(142))
- Luo, X., Xia, J., & Yang, H. (2015). Modeling water requirements of major crops and their responses to climate change in the North China Plain. *Environmental Earth Sciences*, 74(4), 3.531-3.541. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4400-0>
- Molden, D. (1997). *Accounting for water use and productivity (SWIM Paper 1)*. International Irrigation Management Institute. https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/SWIM_Papers/PDFs/SWIM01.PDF
- Montero, J., Martínez, A., Valiente, M., Moreno, M. A., & Tarjuelo, J. M. (2013). Analysis of water application costs with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain. *Irrigation Science*, 31, 507-521. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0326-4>



- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2001). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. <https://www.fao.org/3/x9800s/x9800s00.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2003). *Descubrir el potencial del agua para la agricultura*. <https://www.fao.org/3/Y4525S/y4525s00.htm#Contents>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Estudio FAO Riego y Drenaje* (56). <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW). Managing systems at risk*. <https://www.fao.org/3/i1688e/i1688e.pdf>
- Ouazaa, S., Latorre, B., Burguete, J., Serreta, A., Playán, E., Salvador, R., Paniagua, P., & Zapata, N. (2015). Effect of the start-stop cycle of center-pivot towers on irrigation performance: Experiments and simulations. *Agricultural Water Management*, 147, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.013>
- Pedroza Sandoval, A., Ríos Flores, J. L., Torres Moreno, M., Cantú Brito, J. E., Piceno Sagarnaga, C., & Yáñez Chávez, L. G. (2014). Eficiencia del agua de riego en la producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) y alfalfa (*Medicago sativa*): impacto social y económico. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 231-239. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v32n3/2395-8030-tl-32-03-00231.pdf>
- Samian, M., Mahdei, K. N., Saadi, H., & Movahedi, R. (2015). Identifying factors affecting optimal management of agricultural water. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(1), 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.01.001>
- Santos, L., De Juan, J. A., Picornell, M. R., & Tarjuelo, J. M. (2010). *El riego y sus tecnologías*. CREA-UCLM.
- Senninger. (s. f). *I-WBO2*. https://www.senninger.com/sites/senninger.hunterindustries.com/files/i-wob2_folleto.pdf
- Tarjuelo, J. M., De Juan, J. A., Valiente, M., & García, P. (1996). Model for optimal cropping patterns within the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. II. A case study of irrigation scheduling in Albacete, Spain. *Agricultural Water Management*, 31(1), 145-163. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01220-6](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3774(95)01220-6)
- Yacoubi, S., Zayani, K., Slatni, A., & Playán, E. (2012). Assessing sprinkler irrigation performance using field evaluations at the Medjerda Lower Valley of Tunisia. *Engineering*, 4(10), 682-691. <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2012.410087>
- Zhang, L., & Merkle, G. P. (2012). Relationships between common irrigation application uniformity indicators. *Irrigation Science*, 30, 83-88. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0264-6>



Zwart, S. J., & Bastiaanssen, W. G. M. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69(2), 115-133. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>