



UTILIZACIÓN DE LA **MICROMETEOROLOGÍA** EN LA MEDICIÓN DE LA ASIMILACIÓN DE CARBONO Y LA TRANSPIRACIÓN EN CAÑA DE AZÚCAR

POR M.A. GARCÍA-DELGADO*, G. BUSTOS-VÁZQUEZ, J.E. CERVANTES-MARTÍNEZ Y E. COMPEÁN-RAMÍREZ, UNIDAD ACADÉMICA MULTIDISCIPLINARIA MANTE, A. ZERMEÑO-GÓNZALEZ, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO, SALTILLO, COAHUILA, B. CANALES-LÓPEZ, PALAÚ BIOQUIM, S.A. DE C.V., SALTILLO, COAHUILA
* AUTOR RESPONSABLE: MIAGARCI@UAT.EDU.MX



RESUMEN

Desde agosto de 2008 hasta el año en curso se está realizando la evaluación del efecto de la aplicación de algaenzimas en la tasa de asimilación de bióxido de carbono y la transpiración de la caña de azúcar, con la utilización de instrumental científico micrometeorológico con tecnología de vanguardia. Este tipo de estudio es el primero que se ejecuta a nivel nacional, el cual se está llevando a cabo en un rancho localizado en el tramo carretero Y griega de Xicoténcatl-Ingenio “Aarón Sáenz Garza”, en el municipio de Xicoténcatl, Tamaulipas.

ABSTRACT

Since august 2008 until the year in course, the evaluation of the effect of algaenzims in the assimilation of carbon dioxide and the sugar cane transpiration with the utilization of a micro meteorologic scientific instrument and the latest technology is in course. this type of study is the first done at a national level, this study is happening in a located in the “y griega” from Xicotencatl-ingenio “Aaron Saenz Garza”, in Xicotencatl, Tamaulipas.

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica vegetal está compuesta de átomos de carbono, los cuales provienen de la biósfera. Estas moléculas penetran a la planta como bióxido de carbono (CO_2) a través de los espacios estomáticos de las hojas, cuando están abiertos y semiabiertos, mientras que el agua en forma de vapor sale por difusión (transpiración) a través de estos poros estomáticos (Figura 1a). Para el proceso fotosintético se necesita además de la energía solar, como materia prima el CO_2 y el agua; la transpiración es necesaria para mantener la temperatura interna estable en las plantas. Es importante destacar que las moléculas de vapor de agua se difunden 1.6 veces más rápido que las moléculas de CO_2 debido a que su peso molecular es menor, y que la atmósfera normalmente contiene de 10 a 100 veces más vapor de agua que CO_2 . Estudiar y comprender estos procesos biofísicos en las plantas, así como analizar los factores ambientales micrometeorológicos que influyen en la asimilación de CO_2 y la transpiración de las hojas de los cultivos, resultaba una tarea difícil (Salisbury y Ross, 1994), debido a que muchos factores ambientales interactúan de diferentes maneras, entre los se encuentran: la temperatura del aire y del suelo, la velocidad y dirección del viento, la lluvia, la energía de la radiación solar incidente, el flujo de calor del suelo y de la planta, la humedad relativa, el contenido de humedad del suelo y el tiempo (hora del día), se hizo necesario utilizar herramientas de medición que nos revelaron estos datos.

La porometría es el estudio de la difusión de gas a través de los poros, especialmente a través de los estomas de las hojas de las plantas (Figura 1a). El uso de porómetros (Figura 1b) es importante en muchas áreas de investigación de plantas (García-Delgado, 2006). Estos instrumentos eran los más utilizados en las mediciones de los flujos gaseosos en los estomas de las hojas; desafortunadamente, alteran las hojas y disturbian el funciona-



miento de los estomas de las mismas al realizar las mediciones, en consecuencia se registran datos alterados; las mediciones son puntuales en una sección de la hoja de la planta. Las estaciones micrometeorológicas que están compuestas por una gran variedad de sensores, instrumentos científicos de gran exactitud y confiabilidad, tienen la ventaja de que se instalan en predios cultivados con superficies mayores

de cuatro hectáreas, totalmente diferente a las mediciones realizadas con los porómetros. Se ubican sobre la superficie de cultivo, causan mínimas alternaciones del microclima del ecosistema bajo estudio, permiten realizar mediciones continuas y proveen mediciones integrales del flujo gaseoso, radiactivo y de calor (Baldocchi et al, 1988).

La caña de azúcar es uno de los cultivos más importantes en el sur de Tamaulipas desde el punto de vista agrícola (por la superficie sembrada), social y económico ya que de este cultivo depende un amplio sector de la economía de los municipios de Mante, Xicoténcatl, Gómez Farías, Antiguo Morelos, Ocampo, González y Nuevo Morelos, debido a la mano de obra directa generada en el campo, e indirecta, durante su procesamiento, en los ingenios Aarón Sáenz Garza y El Mante ubicados en la región (Mata-Vázquez, 2006). Actualmente se cultivan alrededor de 58 mil hectáreas de caña, de las cuales se cosechan anualmente más de 35 mil hectáreas (SIAP-Sagarpa, 2005).

La nutrición vegetal, así como el uso y manejo eficiente del agua, son los factores que posiblemente inciden más directamente sobre el rendimiento del cultivo y la productividad del suelo; sin embargo, el alto costo de los fertilizantes han provocado la búsqueda de alternativas en el uso de productos naturales u orgánicos donde se incluyen la utilización de microorganismos fijadores de nitrógeno atmosférico en esta gramínea, así como el

Foto: <http://www.larevistaintegral.com/2204/ran-dulces-tan-naturales.html>

Fotos: Cortesía del autor

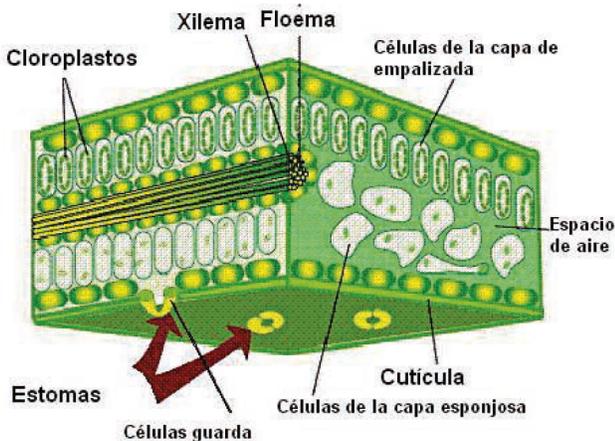


FIGURA 1A.

Intercambio gaseoso foliar (células guarda estomáticas).
 Disponible en: <http://img.sparknotes.com/figures/B/brab5bb87aee74a86fdae78ed564e663/leaf.gif>



FIGURA 1B.

Porómetro de estado estable de estado estable.
 Disponible: <http://solostocks.cl/img/porometro-pmr-5-265504so.jpg>

uso de otros organismos como son las algas cianofíceas enriquecidas o extractos de algas marinas enriquecidas con enzimas, entre otros biofertilizantes que ayuden a disminuir el uso de fertilizantes sintéticos y logren disminuir los costos de producción en las zonas cañeras.

La utilización de algaenzimas en el contexto de la agricultura orgánica y sustentable conservan y mejoran la fertilidad del suelo, incrementan y eficientizan las funciones metabólicas de la planta, manifestándose en una mayor productividad de los cultivos. Por medio del uso de tecnología aplicada fundamentada en extractos de algas marinas, los suelos cañeros tratados con algaenzimas generan una mayor densidad de raíces en la caña; en respuesta, se tienen plantas más vigorosas en beneficio de un mayor rendimiento y una mayor concentración de azúcares o incremento de grados Brix (Canales-López, 1997; Canales-López, 2006). Con el uso de algaenzimas en los cultivos se ha logrado incrementar la producción y calidad de las especies frutícolas como manzano, vid y nogal, así mismo, se ha elevado el contenido proteínico en los cultivos de maíz, cebada, trigo y cilantro. En el de la caña de azúcar se incrementa la densidad radicular y el área foliar, manifestándose en un mayor rendimiento (Reyes, 1993).

Bajo la premisa que el contenido de CO₂ atmosférico es más o menos constante, mientras que la humedad del suelo disponible para la planta es muy variable, la mayoría de los sensores micrometeorológicos están relacionados con la medición de la evapotranspiración (ET) o consumo de agua por los cultivos, para lograr un manejo eficiente del agua aplicada a través de los sistemas de riego. Los métodos micrometeorológicos tienen varias ventajas sobre los métodos estimativos de la evapotranspiración de los cultivos. Existen varios métodos para medir el contenido de humedad del suelo, que se pueden clasificar en directos e indirectos. En las técnicas de medición directa se encuentran el método gravimétrico y los lisímetros de pesada, entre los indirectos están el aspersor de neutrones, tensiómetros, bloques de resistencia y la resonancia magnética. Además las mediciones realizadas con una estación micrometeorológica corresponden a superficies extensas. Se pueden obtener registros de los horarios de evapotranspiración y de asimilación de bióxido de carbono de los cultivos, de tal forma que se pueden evaluar los efectos de las variaciones ambientales instantáneas en la tasa de ET de los cultivos y la fijación de bióxido de carbono. Debido a que se obtienen las tasas diarias de ET, se puede determinar el momento oportuno y los volúmenes de riego por aplicar en sistemas agrícolas (Zermeño-González, 2006).

Instrumentación: Debido a que los remolinos (eddies) próximos a la superficie son muy pequeños y rápidos, las mediciones deben hacerse a una frecuencia alta (5 a 10 Hz), para obtener promedios de 20 a 30 minutos. La componente vertical del viento (w) se mide con un anemómetro sónico unidimensional o tridimensional, la temperatura del aire (T) se mide con termopares de alambre fino de chromel-constantan (1.27m² de diámetro) y la humedad específica con un higrómetro de criptón de respuesta rápida. Los sensores registran lecturas los cuales almacenan datos automáticamente en un datalogger y micrologger; se pueden programar para tomar lecturas con frecuencias de 1 a 5 segundos y registrar los promedios desde un

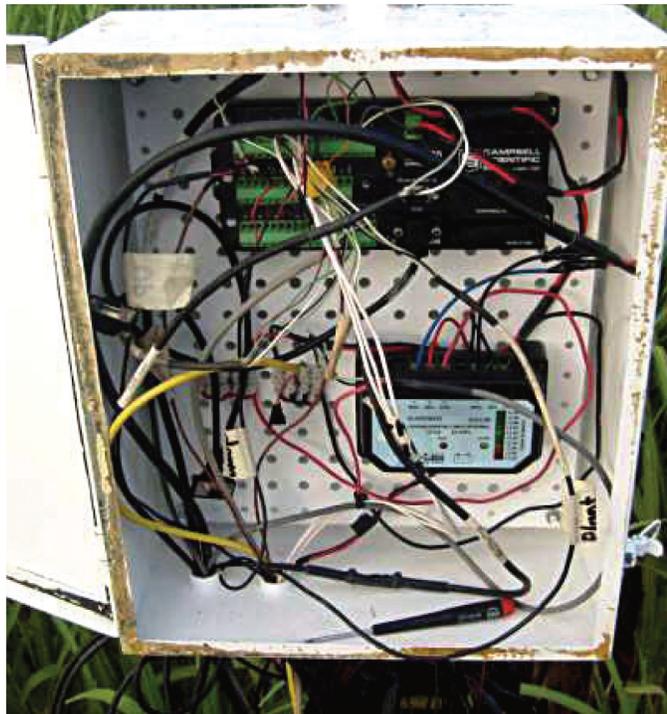


FIGURA 2A

Panel principal incluye Micrologger para el registro y almacenamiento de datos y Voltímetro con indicadores de carga.



FIGURA 2B

Programador Campbell Scientific® y computadora portátil para la programación de mediciones y la transferencia de datos.

**FIGURA 3A.**

Sensores para medir el flujo de calor en la raíz de la planta y disco de flujo de calor en el suelo (soil and plant sensor).

**FIGURA 3B.**

Sensores Termopares para medir la temperatura del suelo.

minuto hasta una hora, según sea la necesidad y el detalle de la información que el estudio requiera; por ejemplo en el presente estudio, se toman lecturas con frecuencias de cada cinco segundos y se registra el promedio de cada media hora, por lo tanto, el dato reportado de la variable ambiental medida, es el valor promedio de 360 lecturas. En el rancho en estudio, el registro y almacenamiento de datos se realiza con un micrologger (Figura 2a), la programación y transferencia de datos para su análisis se hace con un programador específico de sensores y una computadora portátil (Figura 2b).

Para medir los componentes de la ecuación del balance de energía (Penmann-Monteith modificada) utilizada por la FAO, se utilizan entre otros, instrumentos como el flujo de calor en la superficie del suelo y en la zona radical del cultivo, la cual se obtiene midiendo la energía a 8 cm (centímetros) de profundi-

**FIGURA 4A.**

Sensor para medir la radiación neta en el cultivo (Net Radiometer).

**FIGURA 4B.**

Anemómetro sónico tridimensional (3-D Sonic Anemometer) y Analizador de flujo de gases CO₂/H₂O Modelo CS-7500 (Open Path CO₂/H₂O Gas Analyser).

dad con dos platos de flujo de calor y realizando la corrección por cambios de temperatura del suelo sobre el plato (Figuras 3a y 3b). La radiación neta (R_n) es la fracción de la radiación solar que es recibida en la superficie terrestre y no reflejada o reemitida a la atmósfera; ésta expresa un balance entre la radiación solar incidente sobre una superficie y la radiación reflejada por la misma y se expresa en unidades de energía en W/m²; la R_n se mide con un radiómetro neto (Figura 4a). Para medir la velocidad y dirección del viento, en el estudio se utilizó un Anemómetro Sónico Tridimensional (Figura 4b).

El Analizador de flujo de gases CO₂/H₂O (Figura 4b) mide el funcionamiento estomático general en la extensión de caña de azúcar bajo estudio, específicamente el flujo de los gases CO₂ y vapor de agua, en el flujo microambiental de los predios analizados próximos al suelo. De la vegetación y de otras superficies



FIGURA 5A.

Sensores para medir la entrada y salida de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) expresado como flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) o unidades cuánticas (In and Out Quantum Sensor)

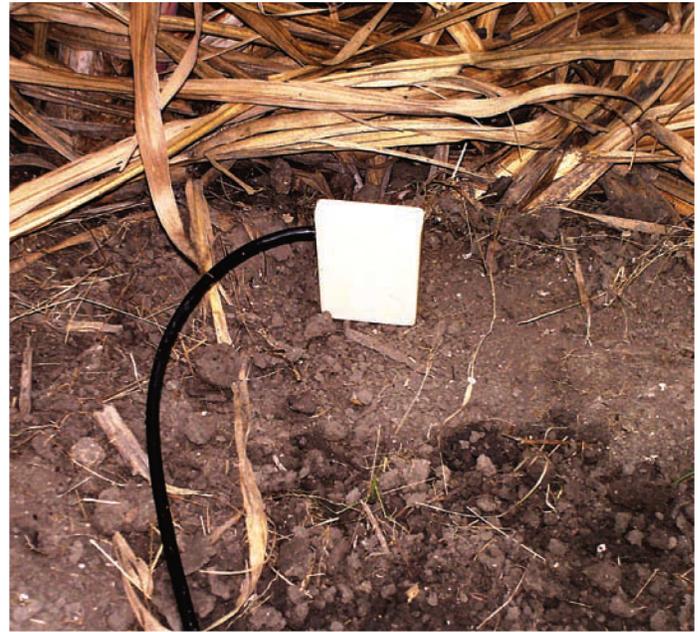


FIGURA 6A.

Time Domain Reflectometry (TDR).



FIGURA 5B.

Sensor para medir la precipitación pluvial (pluviómetro).

rugosas se induce la producción de remolinos (eddies); para medir correctamente estos remolinos, se requiere de un analizador de alta precisión y de alta velocidad. La Figura 4b muestra dos instrumentos, los cuales son componentes esenciales en una estación micrometeorológica típica de la covarianza Eddy. El flujo del CO₂ y de H₂O de una superficie con follaje se obtiene de la velocidad vertical del viento (medida con un anemómetro



FIGURA 6B.

Batería de Tensiómetros.

tridimensional) y de la concentración gaseosa del remolino (medido con el CO₂/H₂O Gas Analyser).

El modelo utilizado en este estudio LI-7500 (o CS-7500) es liso, simple y aerodinámico para el analizador de gases CO₂/H₂O; las innovaciones en este sensor incluyen, la óptica, la electrónica y el software que permite las lecturas rápidas, exactas de las densidades de flujo del CO₂ y H₂O en estructuras turbulentas del aire (remoli-

nos o eddies). En los estudios de la covarianza Eddy, estos datos se utilizan conjuntamente con datos medidos con el anemómetro tridimensional para determinar los flujos del CO₂ y de H₂O.

Los sensores cuánticos de entrada y salida en el cultivo (Figura 5a) miden la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), en unidades energéticas en un rango de longitud de onda de 400 a 700 nanómetros del espectro electromagnético de la radiación solar, en los cuales se encuentran las longitudes de onda más activas de la fotosíntesis. Las plantas utilizan energía para llevar a cabo este proceso, por lo tanto, la PAR puede ser expresada en unidades de energía en W/m² o como densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) y se expresa como unidades de quantums (fotones) por área por unidad de tiempo, micromoles por metro cuadrado por segundo, como se registran en los sensores del este estudio. La cantidad de PPFD que utiliza la planta en la fotosíntesis se obtiene por diferencia entre la energía radiante que entra al cultivo (In Quantum Sensor) y la energía radiante que sale (Out Quantum Sensor) o que es emitida de la superficie del cultivo de caña de azúcar.

La humedad del suelo está en continuo movimiento, debido a que su contenido varía a través del tiempo, lugar y profundidad del suelo, producto del riego, la lluvia, los procesos de evaporación del suelo, transpiración de las plantas y de la energía potencial y dinámica del agua en el subsuelo. Por lo tanto, se necesita medir la aportación efectiva de agua al cultivo producto de la precipitación, la cual se midió con el pluviómetro (Figura 5b). El monitoreo de la humedad del suelo, es una técnica que permite realizar un inspección en el tiempo, del contenido de agua y a la vez permite determinar el momento oportuno de aplicar el riego de acuerdo al tipo de suelo y especie cultivada (García-Delgado, 2006; Zermeño-González et al., 2007). Existen varias técnicas y métodos para medir la variación del contenido de humedad del suelo, que se pueden clasificar en directos (método gravimétrico y lisímetros de pesada), e indirectos (aspersor o dispersor de neutrones, tensiómetros, bloques de re-



FIGURA 7.

Estación micrometeorológica completa con los componentes necesarios para el Método de Correlación Eddy.

sistencia y resonancia magnética). En la Figura 6a se muestra un ejemplo de uso de tensiómetros; por su versatilidad los sensores de la humedad del suelo TDR, se utilizan como instrumentos para la medición de la variación temporal del contenido de humedad del suelo; en este estudio se utilizaron los tensiómetros (Figura 6b) que miden potencial mátrico del suelo, para realizar la calibración cruzada por el método gravimétrico y obtener el modelo de ajuste del sensor TDR. La Figura 7 muestra una visión completa de los componentes (instrumentos, controles y estructura) de una estación micrometeorológica para un Sistema Eddy.

CONCLUSIONES

Los resultados definitivos de la investigación *utilización de la micrometeorología en la medición de la asimilación de carbono y la transpiración en la caña de azúcar* permitirá comprender los procesos biofísicos en las plantas y analizar los factores ambientales que influyen en la asimilación del CO₂ y la transpiración de las hojas de los cultivos. ||

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Baldocchi, D.D., Hicks, B.B. y Meyers, T.P. (1988). "Measuring biosphere-atmosphere exchange of biologically related gases with micrometeorological methods", en *Ecology*. 69(5), 1331-1340.
- Canales-López, B. (1997). *Las algas en la agricultura orgánica*. Consejo Editorial del Estado de Coahuila.
- Canales-López, B. (2006). *Agricultura Orgánica Aplicada (Algaenzimas)*. Serie de Conferencias del 26 de Octubre de 2006. Unidad Académica Multidisciplinaria Mante, Ciudad Mante, Tamaulipas.
- García-Delgado, M.A. (2006). *Indicadores edáficos, vegetativos y ambientales que determinan el riego*. Jornadas Técnico Científicas: Agua-Suelo-Atmósfera. 22, 23 y 24 de Marzo de 2006. Ciudad Mante, Tamaulipas, México. 118 pp.
- Mata-Vázquez, H. (2006). "Fertirrigación con riego por goteo para alta producción en caña de azúcar", en *Jornadas Técnico Científicas: Agua-Suelo-Atmósfera*. Ciudad Mante, Tamaulipas, México. 22-24 de marzo de 2006.
- Zermeño-González, A., García-Delgado, M.A. Castro-Meza, B.I. y Rodríguez-Rodríguez, H. (2007). "Tensión de humedad del suelo y rendimiento de fruto en limón italiano", en *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30(3): 295-303.
- Reyes, R.D.M. (1993). *Efecto de las algas marinas y ácidos húmicos en un suelo arcilloso y otro arenoso, así como su influencia en lechuga (Lactuca sativa L)*. Tesis de Maestría. Saltillo, Coah., México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Salisbury, F.B. y Ross, C.W. (1994). *Fisiología Vegetal*. México: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Zermeño-González, A. (2006). "Métodos micrometeorológicos y el uso eficiente del agua en la agricultura", en *Jornadas Técnico Científicas: Agua-Suelo-Atmósfera*. Ciudad Mante, Tamaulipas, México. 22-24 de marzo de 2006.