

DetECCIÓN A DISTANCIA DEL ESTRÉS HÍDRICO EN CULTIVO DE ALGODÓN MEDIANTE SENSORES MONTADOS EN PIVOT CENTRAL DE RIEGO

Se ha investigado mucho para la detección del estrés hídrico del algodón (*Gossypium hirsutum* L.) a través de métodos basados en la temperatura infrarroja (IRT), con sensores en campo. Pero su aplicación es complicada, sobre todo por problemas logísticos. Como alternativa, se ha desarrollado el Índice de Déficit Hídrico (IDH) para evaluar el estrés hídrico de los cultivos mediante sensores remotos no integrados en el estrato superior del cultivo. El objetivo de esta investigación es evaluar el rendimiento de un conjunto de sensores, incluyendo modernos sensores IRT y de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) orientados hacia abajo a 45°, y una mini-estación meteorológica, **acoplada de forma no intrusiva a un Pivot central de riego** para detectar el estrés hídrico del algodón utilizando el IDH. Los sensores se utilizaron en un estudio de campo durante dos años, que incluía cuatro tratamientos de riego (0, 30, 60 y 90% de sustitución de ET), en dos campos de algodón. El sistema resultó eficaz para distinguir el estrés hídrico del cultivo para las distintas tasas de riego. La comparación de los resultados con una estación terrestre y las simulaciones indicaron que el IDH sobrestimaba el estrés hídrico en la tasa de riego más alta, pero funcionaba bien para los demás casos. La precisión del sistema podría mejorarse midiendo la cubierta de estrato superior del cultivo de fracción (Fc) desde el mismo punto de vista que los sensores IRT y NDVI **(desde el Pivot, hacia abajo en un ángulo de 45°)**.

Tc= Temperatura de la Cubierta

Ta= Temperatura ambiente

Ts= Temperatura de la superficie

NDVI= Índice de vegetación diferencial normalizado

IDH= Índice de déficit hídrico

Fc= Cubierta de estrato superior del cultivo de fracción

UAS= Sistemas aéreos no tripulados

Según las proyecciones de los modelos climáticos, se esperan temperaturas más cálidas y sequías más graves en el suroeste de Estados Unidos. Dado que la disponibilidad de agua es un factor primordial que determina la productividad de las plantas, el cambio climático se convertirá en un problema cada vez más importante para los productores de cultivos. El algodón de tierras altas se cultiva popularmente, por ejemplo, en la mayoría de las regiones de Texas y alrededores. Un promedio del 32% de la superficie plantada de algodón en Texas era de regadío en 2018, pero ese porcentaje varió entre un 8% en las Rolling Plains y alrededor del 55% en las Northern High Plains. Sin embargo, los enfoques de la gestión del agua del algodón están cambiando en respuesta a una variedad de factores. El algodón de regadío suele producir más fibra y de mejor calidad que la producción de secano, por lo que el riego es una opción deseable para los productores, si hay agua disponible. Las sequías recurrentes y las condiciones climáticas extremas están

haciendo que los rendimientos del algodón de secano sean más impredecibles, aumentando las tasas de evapotranspiración (ET) y la demanda de agua de riego. Pero la principal fuente de agua de riego en el estado, el agua subterránea, también se está agotando rápidamente por la elevada demanda de riego que supera con creces la recarga de las precipitaciones. Por ejemplo, los niveles de agua del acuífero de Seymour, en las llanuras onduladas de Texas, y del acuífero de Ogallala, en la región de las llanuras altas de Texas, están bajando debido a la sobreexplotación. Esto ha reducido considerablemente la capacidad de los pozos de riego, especialmente en las llanuras altas.

En las regiones aldoneras de Texas, los sistemas de riego por goteo y aspersión han sustituido en gran medida a los menos eficientes sistemas de riego por inundación. Los sistemas de riego por aspersión suspendidos (**por ejemplo, los Pivots centrales y los sistemas lineales**) se han ido adoptando cada vez más porque son rápidos de montar, duraderos, relativamente fáciles de manejar y ajustables. Sin embargo, los sistemas de riego eficientes, **como los Pivots y los lineales**, también pueden tener consecuencias negativas, si se ejecutan inadecuadamente. Además del desafío que supone el agotamiento de los acuíferos, el riego excesivo del algodón puede inducir enfermedades en las semillas, aumentar la infestación de plagas y provocar la filtración de nutrientes, lo que puede repercutir negativamente en el rendimiento y la calidad del medio ambiente. En comparación con la sustitución total de la ET mediante el riego, los estudios han demostrado que se puede alcanzar todo el potencial de rendimiento con el uso de menos agua adoptando estrategias de gestión del riego más eficientes. Por lo tanto, un objetivo primordial en la gestión moderna del riego es optimizar simultáneamente el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua de riego, lo que sólo es posible mediante una mejor comprensión de la dinámica del estrés hídrico de los cultivos y una programación eficaz del riego.

Los métodos actuales de programación del riego por aspersión suelen incluir el control del estado hídrico del suelo o de las plantas y, a continuación, el riego en función de umbrales predeterminados. Algunos ejemplos son el control del potencial hídrico del suelo con tensiómetros, la medición de la humedad del suelo mediante sensores electrónicos, el seguimiento del potencial hídrico de las hojas por diversos medios, el cálculo de la sustitución de la ET mediante datos meteorológicos y coeficientes de cultivo, y el cálculo de un índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) mediante la temperatura del estrato superior del cultivo y otras variables meteorológicas. Cada uno de estos enfoques de gestión y programación del riego presenta algunas ventajas e inconvenientes. Los métodos basados en la humedad del suelo, por ejemplo, requieren la instalación en el campo de sensores que pueden plantear problemas logísticos para las operaciones de campo y tienen graves limitaciones espaciales, incluso si se invierten recursos para instalarlos ampliamente. La mayoría de los métodos del tipo CWSI también se basan en sensores de temperatura por infrarrojos (IRT) instalados sobre el terreno, que presentan las mismas dificultades y limitaciones. Algunos sistemas basados en sensores, como las cámaras termo gráficas, tienen actualmente un coste elevado y complejos requisitos de pos procesamiento que los hacen inaccesibles para la mayoría de los productores de cultivos. **Una posible solución a estos problemas prácticos en los sistemas de riego de Pivot central y lineales** es montar sensores IRT y de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en los sistemas de riego y utilizarlos junto con datos meteorológicos para implementar sobre la

marcha la supervisión y el control del riego basados en sensores. Este enfoque eliminaría el uso de sensores en el campo y permitiría **recoger datos sobre el estrés hídrico de los cultivos justo donde el Pivot está regando** mientras se desplaza por el campo.

La temperatura de la cubierta se considera desde hace tiempo un buen indicador del estrés hídrico de los cultivos, y el CWSI es uno de los principales modelos del estado hídrico de los cultivos utilizados para la programación del riego. El modelo CWSI requiere el cálculo de tres tipos de diferenciales de temperatura entre el estrato superior del cultivo y el aire, incluida la diferencia de temperatura real entre el estrato superior del cultivo y el aire (es decir, $T_c - T_a$), la diferencia de temperatura entre el estrato superior del cultivo y el aire para una superficie de cultivo bien regada con transpiración completa y la diferencia de temperatura entre el estrato superior del cultivo y el aire para una superficie de cultivo seca sin transpiración. La temperatura del estrato superior del cultivo se mide mediante IRT sin contacto o cámaras termográficas. Sin embargo, hasta que se alcanza la cobertura total del dosel, las mediciones de la temperatura realizadas con IRT por encima del estrato superior del cultivo se ven influidas por la temperatura del suelo dentro del campo de visión del sensor. Para superar este reto y limitación, Moran et al. modificaron el modelo CWSI en el Índice de Déficit Hídrico (IDH) introduciendo un parámetro de cubierta de estrato superior del cultivo de fracción (F_c) que abordaba la influencia del fondo del suelo en la cobertura parcial de la vegetación.

Colaizzi et al. demostraron que el IDH determinado mediante un sistema de sensores montado en un Pivot (4 m de altura sobre el suelo), denominado "*The Agricultural Irrigation Imaging System*", o AgIIS, podía detectar el estrés hídrico en el algodón. El sistema incluía un sensor térmico para registrar la temperatura del dosel, un espectro-radiómetro con bandas de reflectancia para estimar el NDVI, y el F_c se medía manualmente mediante muestreos destructivos para establecer una relación con el NDVI. El sistema se basaba en una estación meteorológica para recoger los parámetros necesarios. También utilizaron sondas de capacitancia para registrar los cambios en el contenido volumétrico de humedad del suelo. Los investigadores no encontraron una buena relación entre el agotamiento del agua del suelo y el IDH. Sin embargo, se observó una buena correlación ($R^2=0,84$ a $0,87$) entre el IDH y el índice de déficit hídrico del suelo (SIDH), que se basa en la ET y en un coeficiente de estrés hídrico del cultivo (K_s). Desde que se publicó ese informe, ya se comercializan sensores de NDVI relativamente baratos que pueden medir continuamente el NDVI en condiciones de campo. También se han producido avances recientes en el desarrollo de estaciones meteorológicas compactas, todo en uno, disponibles en el mercado, que pueden instalarse de forma económica en cualquier lugar. Las estaciones meteorológicas estándar suelen estar disponibles en entornos de investigación, pero la fuente de estos datos suele estar más alejada de los campos de cultivo reales en los que se pretende utilizar estos sistemas.

Los productores de cultivos necesitan tecnologías relativamente sencillas y accesibles para detectar el estrés hídrico de los cultivos y mejorar la gestión del riego. Se ha demostrado que el uso **de un conjunto de sensores basado en IDH montado de forma no intrusiva en sistemas de riego de Pivot central o lineales predice con éxito el estado de humedad del suelo**. Sin embargo, se necesita más investigación para

desarrollar una tecnología de este tipo para uso de los productores, lo que incluye probar el conjunto con sensores modernos que puedan desplegarse fácil y económicamente en entornos de producción. Por lo tanto, **el primer objetivo de esta investigación fue probar un conjunto de detección montado en un Pivot con sensores modernos IRT y NDVI**, además de una mini-estación meteorológica integrada, para detectar el estrés hídrico de los cultivos de algodón mediante el modelo IDH. El segundo objetivo era comparar los resultados con los resultados simulados mediante un modelo de crecimiento de cultivos y, a continuación, determinar la viabilidad de generar prescripciones de riego basadas en los resultados del modelo de simulación.

RESULTADOS

NDVI & FC

Cuando se midió el NDVI mediante **un sensor montado en Pivot y se midió el Fc mediante UAS en Chillicothe en 2021**, se observó una relación lineal entre estos parámetros (Figs. 1, 2). Hubo menos variabilidad en la relación cuando ambos parámetros fueron derivados por UAS ($R^2=0.97$) y más variabilidad cuando las fuentes fueron diferentes ($R^2= 0.77$). **La fuente principal de esta variabilidad fue la salida de NDVI del sensor montado en el Pivot**. En la Fig. 3 se muestra la relación entre el NDVI de ambas fuentes. También hubo una diferencia en la pendiente (m) entre las dos relaciones: $m= 0,94$ del NDVI del Pivot frente al Fc del UAS y $m 1,35$ para UAS NDVI vs. UAS Fc

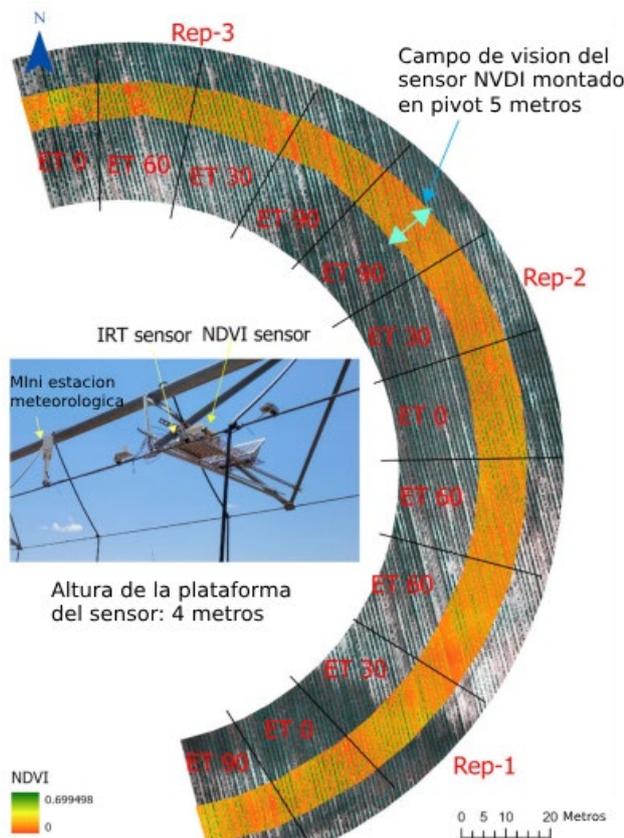


FIG 1. Imagen de una plataforma de sensores montada sobre un Pivot (interior) e imagen del campo del estudio de dos años en la estación de investigación de Chillicothe (exterior). En la imagen del campo, las líneas de parcela se han trazado de forma aproximada y la zona dentro del campo de visión del sensor se designa con la franja naranja.

PARÁMETROS METEOROLÓGICOS

Se realizaron comparaciones entre los datos meteorológicos recogidos por las mini-estaciones meteorológicas, **que se integraron en conjuntos de sensores de Pivot en tres lugares (la estación de investigación de Chillicothe, el Pivot de producción 1 y el Pivot de producción 2)**, y una estación meteorológica estándar en Chillicothe (Tabla 1). También se realizaron comparaciones entre los parámetros meteorológicos recogidos por las mini-estaciones meteorológicas montadas en el Pivot y en el suelo en Chillicothe (Tabla 1). Hubo una gran concordancia entre todas las estaciones meteorológicas en las mediciones de Rn ($R^2=0,98 - 0,99$). Hubo algo más de desacuerdo entre las estaciones meteorológicas en las mediciones de Ta y HR ($R^2=0,96 - 0,99$ y $0,94 - 0,98$, respectivamente), aunque el acuerdo siguió siendo fuerte. No hubo una tendencia aparente en los valores R^2 para Ta y HR coherente con la ubicación o la altura de los sensores. Hubo una mayor variabilidad en las mediciones de la velocidad del viento con la ubicación y la altura de los sensores, con valores R^2 que oscilaron en general entre 0,7 y 0,9. En comparación con las mediciones de la velocidad del viento realizadas por la estación meteorológica estándar de Chillicothe, la estación terrestre situada en el Pivot presentó una mayor concordancia que el sensor montado en el Pivot ($R^2=0,87$ frente a 0,70). En los Pivots de producción, la concordancia de las mediciones de la velocidad del viento con la estación meteorológica estándar disminuyó ligeramente con la distancia a la estación estándar ($R^2=0,78$ frente a 0,72). **La diferencia entre los sensores montados en el Pivot del productor y la estación meteorológica estándar fue mayor para las mediciones de precipitación** que para todos los demás parámetros meteorológicos, y la variabilidad aumentó al aumentar la distancia entre las estaciones ($R^2=0,46 - 1,0$).

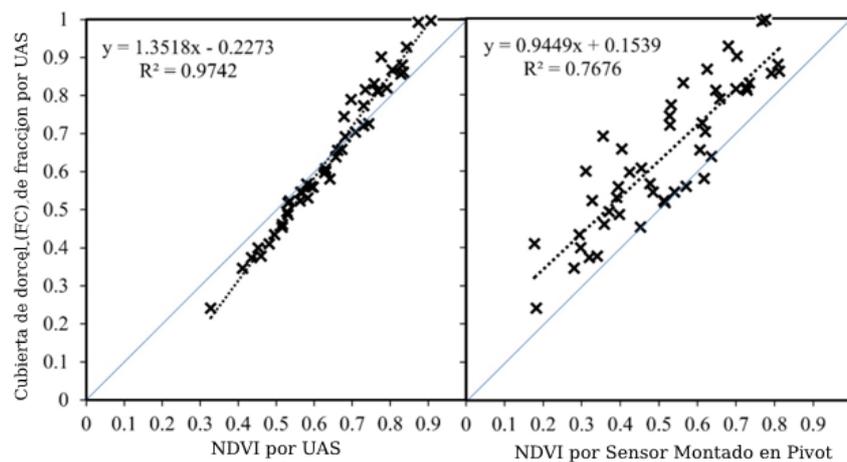


FIG. 2. Relación entre el NDVI y la cubierta de estrato superior del cultivo de fracción (Fc) en 2021 en la estación de investigación de Chillicothe. A la izquierda, el NDVI se midió con UAS. A la derecha, el NDVI se midió mediante un sensor NDVI montado en un Pivot. Fc se midió con UAS en ambos casos.

ESTIMACIONES IDH

Hubo diferencias en el IDH derivado del sensor de los Pivots entre los tratamientos de sustitución de ET en Chillicothe en ambos años de estudio (Tabla 2; Fig. 4). El valor medio estacional del IDH fue el más bajo

(0,31-0,32) con el 90% de sustitución de ET, el intermedio con el 60% de sustitución de ET (0,41-0,48), y el mayor con el 30% y el 0% (secano) de sustitución de ET (0,61 - 0,69) en ambos años (Tabla 2). La falta de diferencia en el IDH entre los tratamientos de 30% y 0% de reemplazo de ET se debió al riego mínimo al 30%, porque la precipitación cubrió en gran parte las demandas de agua a ese nivel (Fig. 5). En el transcurso de la estación, los valores de IDH en cada tratamiento variaron un poco hacia arriba y hacia abajo (Fig. 4), reflejando las respuestas de la planta a los eventos de riego y precipitación (Fig. 5). **Las estimaciones del IDH de los sensores montados en el Pivot al 90% de sustitución de la ET fueron más altas** que las de los sensores situados en el suelo que se colocaron en el mismo sistema de riego hasta unos 90 días después de la siembra. En promedio a lo largo de la temporada, **el IDH derivado del sensor montado en el Pivot fue aproximadamente un 19% más alto que el IDH basado en el suelo** (0,31 frente a 0,25). La relación entre el IDH calculado mediante la medición del sensor montado en el Pivot y el sensor basado en el suelo en una parcela de sustitución del 90% de ET en Chillicothe en 2021 fue $R^2 = 0,58$.

Como se describió anteriormente, **la relación NDVI (Pivot) vs. Fc (UAS) tuvo una amplia variabilidad** (Fig. 2). Para comprender cómo puede haber afectado esta variabilidad a los valores de IDH calculados utilizando esta relación, se calculó el IDH utilizando las dos relaciones NDVI-Fc mostradas en la Fig. 2 [es decir, NDVI (Pivot)-Fc (UAS) y NDVI (UAS)-Fc (UAS)]. En la Fig. 6 se muestra un gráfico comparativo del IDH utilizando estos enfoques. Se observa poca variabilidad, aunque tiende a haber una ligera desviación de la relación 1:1 a medida que aumenta la IDH. Desafortunadamente, **no se tomaron mediciones de Fc desde el punto de vista de los sensores NDVI o IRT montados en Pivots** para su comparación.

De forma similar a los datos de Chillicothe, **los valores del IDH de los Pivots de producción 1 y 2 variaron hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la estación**, reflejando las respuestas de la temperatura de la cubierta a los eventos de riego y precipitación (Fig. 7). Es importante destacar que estos datos sirvieron para demostrar que se podían **obtener datos válidos del IDH a partir de sensores montados en Pivots que tomaban medidas mientras el Pivot estaba aplicando activamente agua de riego**. El IDH derivado de los Pivots de producción utilizando datos meteorológicos de mini-sensores meteorológicos montados en el Pivot se comparó con el IDH utilizando datos meteorológicos de la estación meteorológica estándar de Chillicothe, situada entre 1,5 y 5 km de distancia (**Pivots de producción 1 y 2, respectivamente**). La variabilidad del IDH sólo aumentó ligeramente con la distancia a la estación meteorológica estándar: $R^2=0,96$ para el Pivot de producción 1 y $R^2=0,95$ para el Pivote de producción 2 (Fig. 7).

COMPARACIÓN DEL IDH BASADO EN SENSORES Y EL IDH SIMULADO POR DSSAT EN CHILLICOTHE

En las Figs. 8 y 9 pueden observarse **las tendencias de la IDH derivada de los sensores de los Pivots y de la IDH simulada utilizando el enfoque del Balance Hídrico del Suelo** en el modelo de algodón DSSAT. Aunque los datos IDH basados en sensores son escasos, se aprecia una concordancia general de los datos con las simulaciones, con algunas excepciones (Figs. 8 y 9). La Figura 10 ilustra mejor esas excepciones al presentar las relaciones entre el promedio estacional del IDH basado en sensores y simulado con el rendimiento de la

fibra de algodón. La relación fue lineal en ambos casos ($R^2 = 0.68$ y 0.78 para el sensor y la simulación, respectivamente), pero las diferencias en la pendiente de las relaciones sugieren que el IDH basado en el sensor sobreestimó el estrés hídrico en la tasa de riego más alta. La Figura 11 presenta los resultados del IDH para el conjunto de sensores terrestres (colocado en una parcela con un 90% de sustitución de ET) frente al IDH simulado. Hubo una excelente concordancia entre el IDH derivado de las dos fuentes, hasta unos 80 días después de la plantación, después de lo cual el IDH derivado del sensor tendió a ser mayor que el IDH simulado. Los resultados de la simulación indican los bajos niveles de estrés hídrico experimentados por los cultivos durante este periodo.

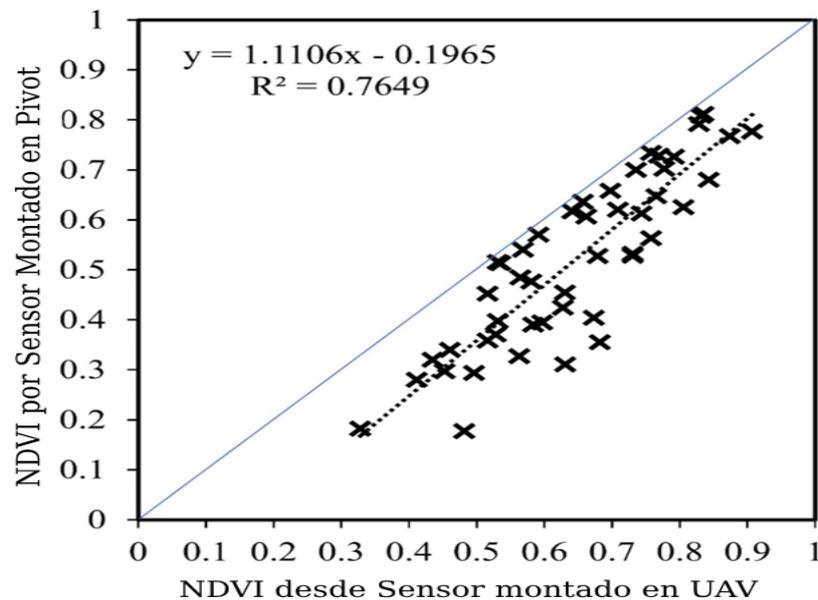


FIG. 3. Relación entre el índice espectral NDVI medido por UAS y por sensores montados en Pivot.

RENDIMIENTO DEL LINO

En Chillicothe, el rendimiento de la fibra de algodón se vio afectado por el riego tanto en 2020 como en 2021 (Tabla 2). El tratamiento de sustitución del 90% de ET tuvo el mayor rendimiento, el 60% fue intermedio, y el 30% y el seco tuvieron el menor rendimiento. Hubo poca (2021) o ninguna (2020) diferencia en el aporte de agua, incluyendo precipitación y riego, entre los tratamientos de sustitución de 30% ET y seco. Esto se debió a que las precipitaciones limitaron la cantidad de riego que se aplicó al tratamiento del 30% (Tabla 2; Fig. 5). Los tratamientos de riego con valores medios de IDH a lo largo de la temporada más alta tuvieron una mayor pérdida de rendimiento de la fibra (Fig. 10).

DEBATE

Los productores de algodón de la región de las Grandes Llanuras del Sur de Estados Unidos y de muchas otras regiones semiáridas del mundo necesitan mejorar la eficiencia del uso del agua de riego y, en última instancia, conservar los recursos hídricos. Los productores suelen planificar el riego basándose en la disponibilidad de agua de riego, la asequibilidad del agua de riego y el rendimiento previsto.

VARIABLES	Nº OBSERVACIONES	X	Y	R2
Radiación solar (MJ m-1 día-1)	215	#Pivot CRS	*CRS Pivot suelo	0,99
	215	Pivot CRS	+ Estación Meteorológica	0,99
	1405	CRS Pivot suelo	Estación Meteorológica	0,99
	1809	¡Producción Pivot 1	Estación Meteorológica	0,98
	1809	^Producción Pivot 2	Estación Meteorológica	0,99
Velocidad del Viento (m/s)	215	Pivot CRS	CRS Pivot suelo	0,90
	215	Pivot CRS	Estación Meteorológica CRS	0,70
	1405	CRS Pivot suelo	Estación Meteorológica CRS	0,87
	1809	Producción Pivot 1	Estación Meteorológica CRS	0,78
	1809	Producción Pivot 2	Estación Meteorológica CRS	0,72
Humedad relativa (%)	215	Pivot CRS	CRS Pivot suelo	0,97
	215	Pivot CRS	Estación Meteorológica CRS	0,95
	1405	CRS Pivot suelo	Estación Meteorológica CRS	0,95
	1809	Producción Pivot 1	Estación Meteorológica CRS	0,96
	1809	Producción Pivot 2	Estación Meteorológica CRS	0,94
Temperatura del Aire (°C)	215	Pivot CRS	CRS Pivot suelo	0,98
	215	Pivot CRS	Estación Meteorológica CRS	0,96
	1405	CRS Pivot suelo	Estación Meteorológica CRS	0,99
	1809	Producción Pivot 1	Estación Meteorológica CRS	0,98
	1809	Producción Pivot 2	Estación Meteorológica CRS	0,97
Precipitaciones (mm)	215	Pivot CRS	CRS Pivot suelo	1,00
	215	Pivot CRS	Estación Meteorológica CRS	0,92
	1405	CRS Pivot suelo	Estación Meteorológica CRS	0,94
	1809	Producción Pivot 1	Estación Meteorológica CRS	0,85
	1809	Producción Pivot 2	Estación Meteorológica CRS	0,46

TABLA 1. Métricas de relación de las variables meteorológicas esenciales para calcular el Índice de Déficit Hídrico (IDH) medidas por diferentes estaciones meteorológicas en distintos lugares. La "Estación Meteorológica CRS" de la Estación de Investigación de Chillicothe es una estación meteorológica estándar, mientras que los datos se recogieron utilizando mini-estaciones meteorológicas en todos los demás casos. #ClimaVue 50 mini-estación meteorológica montada en el Pivot en de Chillicothe con sensores a 4 m de altura del suelo. *Mini-estación meteorológica ClimaVue 50 montada en el suelo en una parcela de sustitución del 90% de ET en Chillicothe con sensores a 2 m de altura del suelo. +Estación meteorológica estándar en la estación de investigación de Chillicothe, situada a unos 500 m del campo de estudio, con sensores a 2 m de altura del suelo. El Pivot de producción 1 estaba situado a 1,5 km de la estación meteorológica estándar de Chillicothe. El Pivot de producción 2 estaba situado a unos 5 km de la estación meteorológica estándar de Chillicothes.

Tratamientos	Rendimiento medio de la fibra (kg ha-1)		Media estacional IDH	
	2020	2021	2020	2021
0% Sustitución ET	625b+	576c	0.60a	0.69a
30% Sustitución ET	471b	663c	0.61a	0.67a
60% Sustitución ET	739ab	1126b	0.42b	0.49b
90% Sustitución ET	1134a	1670a	0.32c	0.31c
Valores P	0.0125 <	0.0001 <	0.0001 <	0.0001

TABLA 2. Significado estadístico y resumen del rendimiento de fibra y promedio estacional del Índice de Déficit Hídrico (IDH) para diferentes tratamientos de riego en las temporadas 2020 y 2021 en la Estación de Investigación de Chillicothe. + Los valores medios dentro de columnas seguidas por la misma letra no son significativamente diferentes según $P \leq 0,05$.

Se han desarrollado enfoques basados en IRT o CWSI para la gestión del agua de riego con el fin de mejorar la precisión y la eficiencia de la gestión del agua de riego, pero su adopción es escasa, probablemente debido a sus propias limitaciones en la práctica.

En el presente estudio, las mediciones del NDVI, la temperatura del estrato superior del cultivo y los parámetros meteorológicos, **cada uno integrado en un conjunto montado en un sistema de riego por Pivot**, resultaron útiles para calcular el IDH como indicador del estrés hídrico de los cultivos. En comparación con el enfoque estándar basado en el CWSI, que utiliza un número limitado de sensores estacionarios en el campo, este enfoque permitió **la detección remota diaria del estrés hídrico del cultivo justo donde el Pivot estaba regando**, haciendo que los datos fueran útiles para ajustar las tasas de riego en tiempo real según las necesidades del cultivo y los objetivos de riego. Con sensores colocados en el Pivot, la captación de la variabilidad espacial del estrés hídrico de los cultivos es mucho más sencilla en comparación con los sensores fijos desplegados sobre el terreno. Podrían añadirse al sistema sensores IRT y NDVI adicionales, instalados arriba o abajo de la instalación, y calcular su promedio para tratar mejor la **variabilidad espacial del estrés hídrico de los cultivos a lo largo de la longitud del Pivot**.

A continuación, se analizan distintos aspectos del conjunto de sensores y su rendimiento.

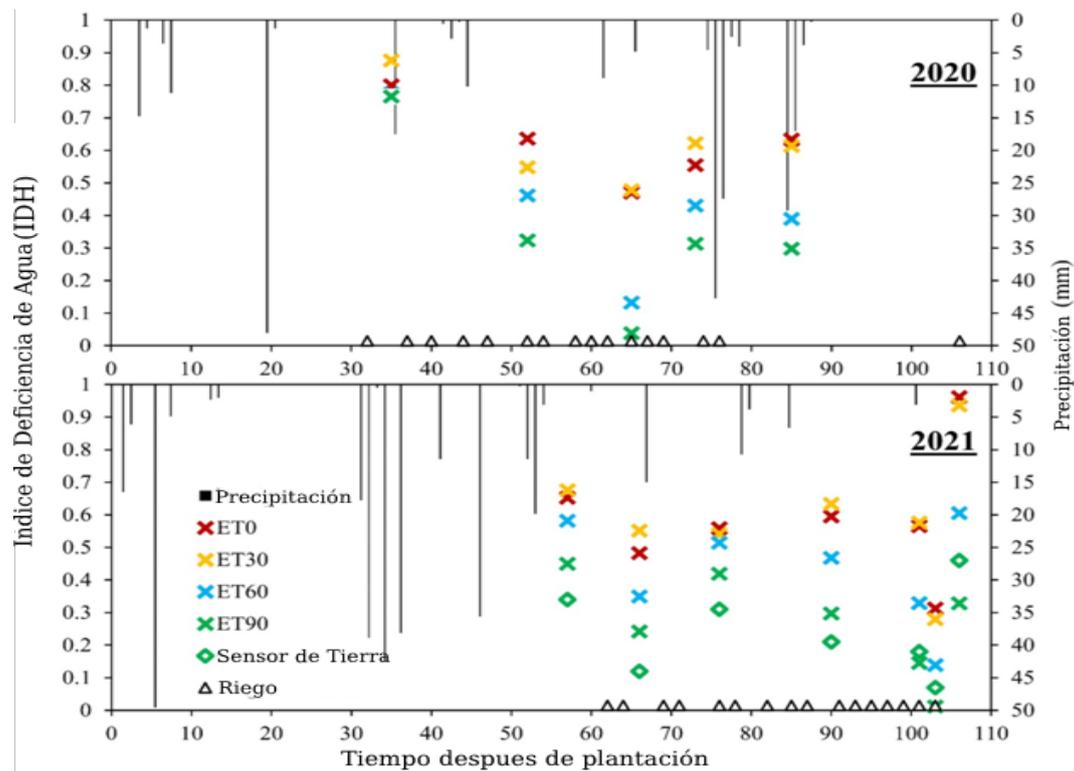


FIG. 4. Índice de déficit hídrico o IDH calculado a partir de los datos de un conjunto de sensores montados en un sistema de riego por Pivot para diferentes tratamientos de riego en la estación de investigación de Chillicothe en 2020 y 2021. ET90 se refiere al 90% de sustitución de ET, ET60 se refiere al 60%, y así sucesivamente. Los datos del IDH del "sensor de suelo" se obtuvieron de un conjunto de sensores con el sensor de temperatura enfocado directamente en el estrato superior del cultivo del cultivo, que se colocó en una parcela ET90.

Para calcular el IDH se necesita una estimación del porcentaje de cobertura del estrato superior del cultivo o Fc. En este estudio, se adoptó un enfoque para estimar Fc indirectamente a través de su relación con NDVI, que ahora se puede medir continuamente utilizando sensores NDVI modernos. El NDVI y el Fc se midieron con UAS desde la formación del capullo hasta la apertura de la flor, y luego se relacionó el Fc con las mediciones del NDVI realizadas con el sensor montado en el Pivot en Chillicothe (Fig. 2). **La relación entre el NDVI montado en el Pivot y el Fc basado en el UAS fue lineal**, pero hubo una variabilidad considerable y una pendiente alterada ($R^2=0,77$, $m=0,94$) en relación con las mediciones puramente UAS. La Figura 3 muestra la relación entre el NDVI del UAS y los sensores del Pivot, **lo que confirma que la fuente de la variabilidad era el NDVI derivado del Pivot**. Existen al menos dos posibles explicaciones para el aumento de la variabilidad. **En primer lugar, en este estudio el algodón se plantó en hileras rectas y no en la trayectoria curva del Pivot** (debido a las dificultades de plantar en una curva en un sistema de riego de tan pequeño tamaño). Como resultado, **el sensor NDVI basado en el Pivot "veía" las hileras de cultivo desde diferentes perspectivas u orientaciones a medida que se desplazaba por el campo**, lo que introducía variabilidad. En segundo lugar, lo ideal sería determinar la relación NDVI-Fc con ambas mediciones realizadas desde **la misma perspectiva o campo de visión que el sensor IRT** (es decir, en un

ángulo descendente de 45° desde el Pivot). Esto no pudo lograrse en dicho estudio para Fc, añadiendo así otra fuente de variabilidad. En cuanto a la pendiente de la relación NDVI-Fc, está documentado en la literatura científica que los diferentes sensores y sistemas utilizados para determinar NDVI y Fc para las relaciones de salida del algodón entre ambos con diferentes pendientes. En particular, los valores de NDVI pueden verse afectados por muchos factores, entre ellos las especificaciones del sensor, el estrés hídrico de la planta, la fase de crecimiento, el estado de nitrógeno de la planta, así como la reflectancia de fondo del suelo antes del cierre de la cubierta.

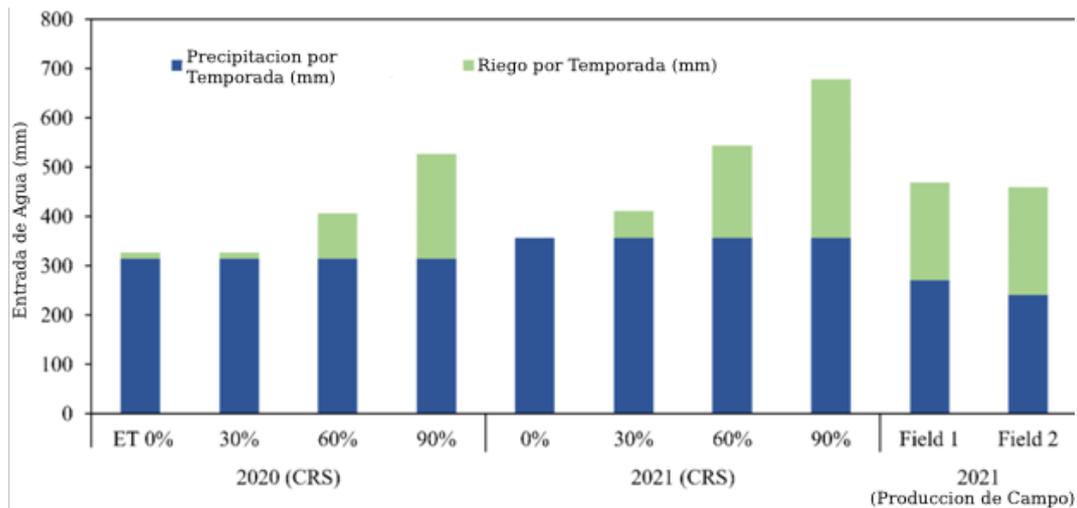


FIG. 5. Aporte total estacional de agua para el algodón en 2020 y 2021 en la estación de investigación de Chillicothe y en dos campos de producción. El agua se aplicó mediante sistemas de riego por Pivote para reponer el porcentaje de pérdida de agua debido a la ET a diferentes niveles en Chillicothe. En los campos de producción, se siguieron las prácticas de riego elegidas por el productor y el agua de riego también se aplicó mediante sistemas de Pivots.

Aunque en este estudio se determinó una gran variabilidad en la relación NDVI-Fc, esta no parecía reflejarse en una cantidad similar de variación en el IDH. Para evaluar esto, se calculó el IDH utilizando las dos relaciones NDVI-Fc ilustradas en la Fig. 2. En ambos casos, Fc provenía de la relación NDVI-Fc. En ambos casos, Fc procedía del UAS, pero la fuente de NDVI (y su variación) difería. En la Figura 6 se compara directamente el IDH calculado con estos enfoques. La falta de variabilidad en los datos sugiere que los valores del IDH no eran muy sensibles a la variabilidad del NDVI. Pero, como se describió anteriormente, **tanto el NDVI como el Fc se habrían medido idealmente desde la perspectiva del sensor IRT montado en el Pivote** para tener en cuenta con mayor precisión las fracciones del estrato superior del cultivo y del fondo visibles para el IRT. Por lo tanto, los valores IDH determinados en este estudio pueden carecer de precisión, lo que se discute más adelante.

Otro objetivo de este estudio era determinar cómo afectaría la fuente de datos meteorológicos a los cálculos del IDH. Esto incluyó una comparación de los parámetros meteorológicos (rs, Ta, HR y precipitación) recogidos por la mini-estación meteorológica terrestre colocada en un tratamiento de

sustitución del 90% de la ET (altura estándar de 2 m) y la mini-estación meteorológica montada en el sistema de riego por Pivot (4 m de altura). En general, hubo una buena concordancia entre las estaciones: Los R2 entre fuentes para rs, Ta, HR y precipitación fueron 0,99, 0,98, 0,97 y 0,99, respectivamente (Tabla 1). Pero la variabilidad en las mediciones de **la velocidad del viento entre las dos estaciones fue algo mayor (R2=0,90), a pesar de la corrección de las mediciones de la velocidad del viento del Pivot a una altura de 2 m**. Es bien sabido que la velocidad del viento cambia con la altura y los anemómetros de las estaciones meteorológicas suelen montarse a 2 m para normalizar las mediciones de la velocidad del viento. La velocidad del viento está inversamente relacionada con la resistencia aerodinámica, que afecta a la transferencia de calor y vapor de agua de la superficie del cultivo^{35,64}. Para simular el efecto de los cambios en la velocidad del viento sobre la IDH, el factor de velocidad del viento se incrementó en un 10% y un 50% en una hoja de cálculo que se utilizó para realizar los cálculos de la IDH para el presente estudio. Este ejercicio mostró que estos cambios aumentaban las estimaciones del IDH en aproximadamente un 7,7% y un 31%, respectivamente, debido a la reducción de la resistencia aerodinámica. La variación real de la velocidad del viento en el presente estudio a 2 m y 4 m de altura fue de aproximadamente un 9% y la velocidad media del viento fue en realidad mayor a 2 m de altura que a 4 m ($4,7 \pm 2,0$ m s⁻¹ frente a $4,3 \pm 1,8$ m s⁻¹).

A pesar de la buena concordancia general en los parámetros meteorológicos entre las estaciones meteorológicas montadas en el suelo y en el Pivot, la relación a lo largo de la temporada entre **el IDH medido en el suelo y en el Pivot en Chillicothe tuvo un R2 relativamente bajo de 0,58** (datos no mostrados). **El IDH determinado usando datos de los sensores montados en el Pivot se mantuvo generalmente más alto durante toda la temporada de crecimiento** que el IDH determinado usando datos basados en el suelo con el sensor IRT directamente orientado hacia el estrato superior del cultivo (Fig. 4). Las diferencias en los datos meteorológicos tuvieron sin duda algún impacto, pero la mayor contribución a la discrepancia fue probablemente la inexactitud en **la contabilización de la influencia del fondo del suelo en las mediciones basadas en Pivots**. Como se describió anteriormente, Fc fue determinado por UAS desde una perspectiva aérea, en lugar de desde el punto de vista del sensor IRT, lo que se espera que conduzca a cierta inexactitud en la estimación de los límites inferiores y superiores en el modelo IDH.

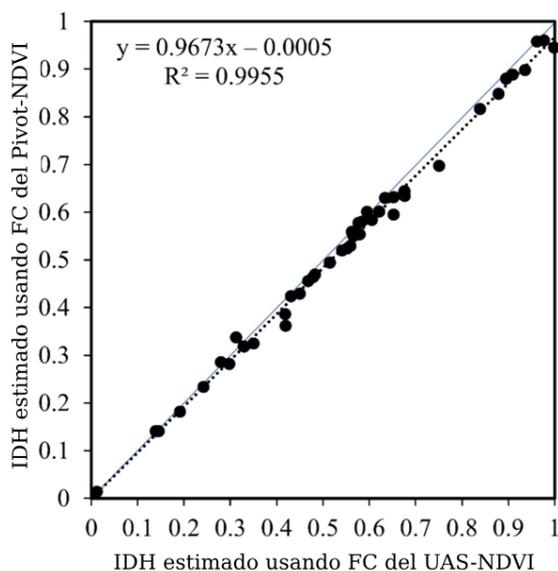


FIG. 6. Comparación de los valores IDH calculados utilizando las dos relaciones NDVI-Fc mostradas en la Fig. 2 [NDVI (Pivot)-Fc (UAS) y NDVI (UAS)-Fc (UAS)].

Al comparar el IDH derivado de los datos de los sensores con el IDH simulado, no hubo una alineación perfecta, pero sí un acuerdo general en las tendencias (Figs. 8, 9).

En las estimaciones basadas en sensores, especialmente en los tratamientos con riego deficitario y sin riego (0% y 30% de sustitución de ET), los valores del IDH experimentaron fuertes disminuciones con los eventos de precipitación o riego, mientras que los cambios en el IDH simulado por DSSAT fueron más suaves (Figs. 8, 9). Esto podría deberse a que la simulación DSSAT promedió el balance hídrico del suelo diariamente, mientras que las estimaciones basadas en sensores se promediaron cada hora. Quizás lo más importante es que las simulaciones DSSAT IDH fueron continuas, mientras que las estimaciones IDH basadas en sensores fueron escasas y periódicas. Cuando se promediaron los resultados del IDH obtenidos por los sensores y los simulados a lo largo de toda la temporada y se evaluó su relación con la producción de fibra, se observaron algunas diferencias. Los valores del IDH derivados de los sensores se ajustaron a un rango relativamente estrecho, subestimando el estrés hídrico de la planta en la tasa de riego más alta (Fig. 10). Como se ha comentado anteriormente, esta imprecisión puede mejorarse determinando la relación NDVI-Fc desde la misma perspectiva desde la que se realizaron las mediciones IRT: desde el Pivot, mirando hacia abajo en un ángulo de 45°. La alineación general de los resultados IDH basados en sensores y DSSAT indica que el conjunto de sensores podría utilizarse junto con DSSAT para generar prescripciones de riego para el algodón, como se describe en mayor profundidad en Ale et al.

Además de comparar los parámetros meteorológicos recogidos a diferentes alturas en el mismo lugar, este estudio también incluyó una comparación de los parámetros meteorológicos recogidos en lugares distintos. Las estaciones meteorológicas están situadas de forma aleatoria en todo el terreno agrícola, y algunos lugares están mejor equipados que otros. Por ejemplo, la Oklahoma Mesonet cuenta con estaciones meteorológicas en una densidad superior a la de la mayoría de los estados o regiones del mundo. Para la mayoría de los productores de algodón de EE.UU. y de todo el mundo, las estaciones meteorológicas más cercanas pueden estar lejos de sus parcelas.

Cualquier variación entre los parámetros meteorológicos reales y los calculados reducirán la precisión de las estimaciones del IDH y de las prescripciones de riego cuando se dependa de datos meteorológicos externos. Para resolver este problema, podrían utilizarse estaciones meteorológicas modernas, compactas y relativamente baratas, como las utilizadas en esta investigación, para proporcionar datos meteorológicos in situ. Este tipo de estación meteorológica puede tener una precisión algo menor en comparación con una estación meteorológica estándar, pero puede representar el tiempo local bastante bien. Por ejemplo, Dombrowski et al. probaron el rendimiento de la estación meteorológica ATMOS41 todo en uno e informaron de una subestimación de las rs del 3% y una variabilidad de las precipitaciones del $\pm 7,5\%$ en comparación con la estación meteorológica estándar en el mismo lugar. Sugirieron que la mayor variabilidad de las precipitaciones se debía a errores provocados por el viento.

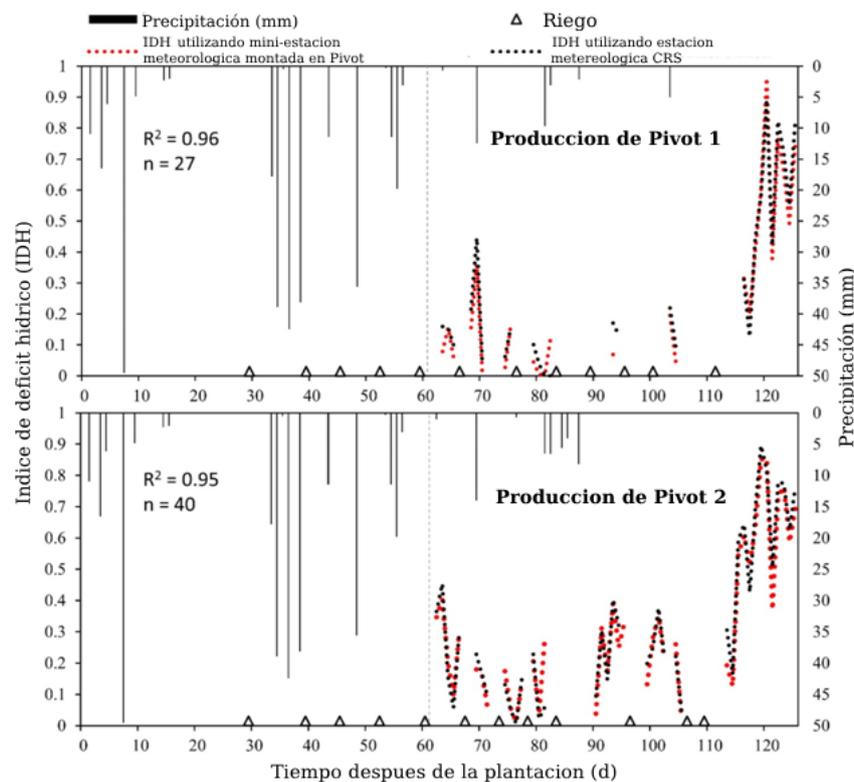


FIG. 7. Índice de déficit hídrico (IDH) calculado para el algodón en dos sistemas de riego por Pivot de producción en 2021. Las plataformas de sensores se instalaron en los Pivots poco más de 60 días después de la siembra. Se realizan comparaciones del IDH calculado utilizando datos de mini-estaciones meteorológicas integradas en el sistema y datos de una estación meteorológica estándar distante en la estación de investigación de Chillicothe. El Pivot de Producción 1 y el Pivot de Producción 2 estaban situados a aproximadamente 1,5 km y 5 km de la estación meteorológica estándar, respectivamente. Los datos de precipitación mostrados en ambos gráficos antes de las líneas discontinuas verticales proceden de la estación meteorológica estándar, y los datos después de la línea discontinua proceden de las mini-estaciones meteorológicas integradas.

Al comparar los parámetros meteorológicos obtenidos por la estación meteorológica estándar de Chillicothe **con las mini-estaciones meteorológicas de los Pivots de Producción 1 y 2** (a una distancia de entre 1,5 y 5 km de Chillicothe, respectivamente), la concordancia en las mediciones de r_s ($R^2=0,97-0,98$), T_a ($R^2=0,97-0,98$) y H_R ($R^2=0,94-0,96$) fue excelente (Tabla1). La variabilidad de la velocidad del viento fue mayor entre localidades ($R^2=0,72 - 0,78$). Pero la variabilidad potencial fue mayor en las mediciones de precipitación ($R^2=0,46-0,85$), como cabía esperar. Aalbers et al. mencionaron que la heterogeneidad espacial en el viento y la precipitación, incluso dentro de áreas pequeñas, podría surgir debido a la naturaleza caótica inherente de los procesos atmosféricos/oceánicos/de la superficie terrestre y sus interacciones. Weaver y Nigam señalaron que existe una gran variabilidad estacional y diurna de la distribución del flujo de humedad y de la estructura del soplo de viento en la región de las Grandes Llanuras, algo que conocen bien los productores de cultivos de la región.

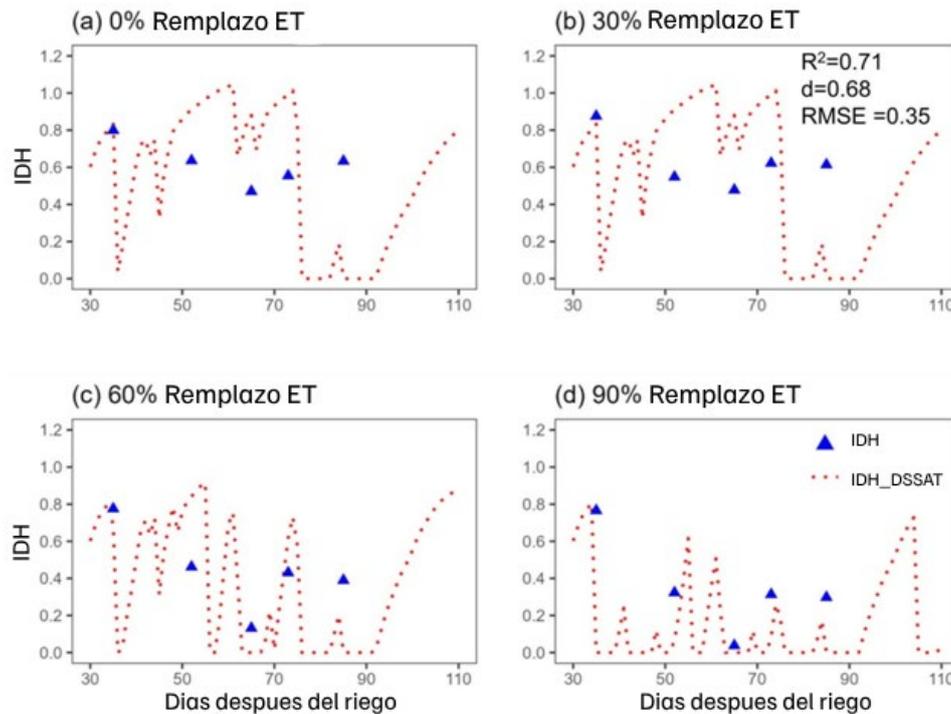


FIG. 8. Comparación del Índice de Déficit Hídrico (IDH) calculado directamente usando datos de campo de un conjunto de sensores montados en Pivot y simulado usando el método de Balance Hídrico del Suelo en DSSAT para algodón manejado bajo diferentes regímenes de riego de sustitución de ET en la temporada de crecimiento 2020.

Los IDH de los Pivots de Producción 1 y 2 se calcularon **utilizando datos meteorológicos de mini-estaciones meteorológicas montadas en los Pivots** e integradas en esos conjuntos de detección, y se compararon con los cálculos realizados utilizando datos de la estación meteorológica estándar de Chillicothe (a una distancia de 1,5 y 5 km). Se observó una excelente concordancia en los IDH utilizando las distintas fuentes de datos meteorológicos, con valores R2 de 0,95 a 0,96 (Fig. 7). Es probable que el nivel de precisión de estos estudios de caso sea suficiente para que el uso de una mini-estación meteorológica integrada o el recurso a datos meteorológicos externos sea aceptable para la mayoría de los productores de algodón. El uso de una estación meteorológica integrada en el sistema adquiriría mayor importancia a medida que el clima local difiriera más de la mejor fuente meteorológica externa disponible para un productor.

CONCLUSIONES

Se comprobó que **un conjunto de sensores montados en un sistema de riego de Pivot central** con modernos sensores IRT y NDVI, y una mini-estación meteorológica integrada, era eficaz para distinguir el estrés hídrico en el algodón entre una serie de tratamientos de riego utilizando el modelo IDH. **Las mediciones realizadas desde los Pivots de producción** (con emisores tipo LEPA) **confirmaron que el sistema funcionaba eficazmente incluso cuando el Pivot estaba aplicando activamente agua de riego.** El modelo IDH requiere estimaciones continuas del porcentaje de cobertura del estrato superior del cultivo o

Fc. Los resultados mostraron que la salida de un sensor NDVI montado en un Pivot en ángulo estaba linealmente relacionada con el Fc determinado desde el aire por UAS, pero con una gran variación. La fuente de la variabilidad era la medición del NDVI y esa variabilidad probablemente se debía principalmente a la orientación recta (no curva) de la plantación del cultivo en el campo, aunque la salida del IDH no parecía ser sensible a la variabilidad. La comparación entre el IDH del Pivot y el del suelo indicó que el **estrés hídrico del cultivo estaba siendo sobreestimado por el sistema del Pivot con la tasa de riego más alta**. La comparación de los resultados del IDH con las simulaciones de estrés hídrico de los modelos de cultivo mostró una gran concordancia entre los valores medidos y los predichos, aunque las simulaciones, en consonancia con la comparación entre el IDH de Pivot y el de suelo, sugirieron que el IDH sobrestimaba el estrés hídrico en la tasa de riego más alta. Esta imprecisión puede mejorarse midiendo Fc desde el mismo punto de observación que los sensores IRT y NDVI.

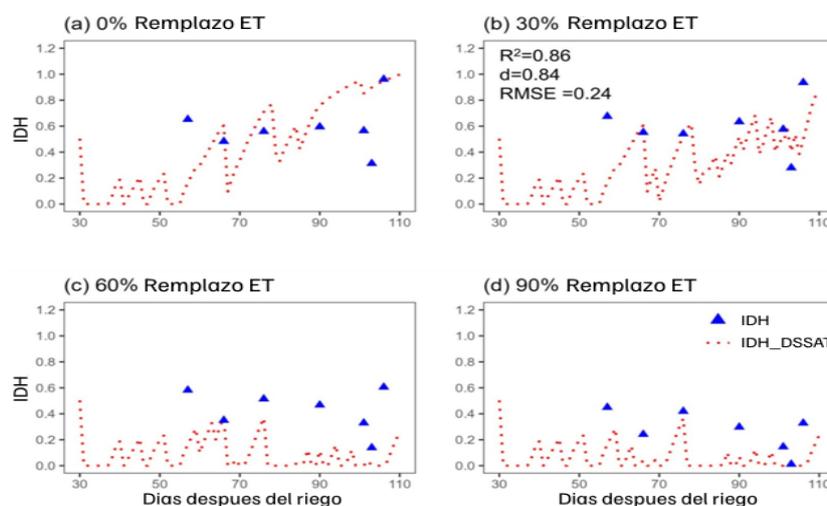


FIG. 9. Comparación del Índice de Déficit Hídrico (IDH) calculado directamente utilizando datos de campo de un conjunto de sensores montados en un Pivot y simulado utilizando el método de Balance Hídrico del Suelo en DSSAT para algodón gestionado bajo diferentes regímenes de riego de sustitución de ET en la estación de crecimiento de 2021.

La alineación general de los resultados de IDH basados en sensores y en DSSAT indica que el conjunto de sensores podría utilizarse junto con DSSAT u otro modelo para generar prescripciones de riego para el algodón. Dado que el sistema de sensores carece de sensores de humedad del suelo u otras mediciones directas del agua, sería necesario un enfoque de modelización para ello. La integración de una mini-estación meteorológica en el conjunto de sensores IDH representó eficazmente las condiciones meteorológicas in situ, observándose en general una buena correspondencia con una estación meteorológica estándar cercana. Los campos de producción suelen estar alejados de las estaciones meteorológicas estándar y, entre todos los parámetros meteorológicos medidos, la velocidad del viento y las precipitaciones mejoraron especialmente al utilizar una mini-estación meteorológica integrada en comparación con una estación meteorológica alejada. En general, el estudio confirmó que este método de detección del estrés hídrico del algodón era viable, aunque su precisión podía mejorarse como se ha descrito anteriormente.

MATERIALES Y METODOS:

ESTUDIO DE CAMPO DE DOS AÑOS SOBRE LA TASA DE RIEGO

Diseño experimental y descripción del lugar

En la Estación de Investigación Chillicothe de Texas A&M AgriLife, cerca de Chillicothe, TX, USA (34°11'39" N, 99°31'07" O), se llevó a cabo un estudio de dos años sobre la tasa de riego en las temporadas de crecimiento de verano de 2020 y 2021. **Se utilizó un sistema de riego de Pivot central de dos torres**, que se modificó con aplicadores de agua LEPA (aplicación de precisión de baja energía) que emitían agua hacia el exterior en un radio de aproximadamente 1 m desde las cerchas de soporte del Pivot. **El Pivot estaba equipado con FieldNet** (Lindsey Corporation, NE), **que permitía personalizar las tasas de riego en zonas a lo largo de la trayectoria del Pivot**. La tasa de riego se modificó ajustando la velocidad de desplazamiento del Pivot. La mitad de la superficie cubierta por el Pivot se utilizó para este estudio, que se dividió en 12 porciones de tarta, cada una de las cuales ocupaba 1/12 de la superficie (Fig. 1). Las parcelas se dispusieron en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones de cuatro tratamientos de riego. Los tratamientos se basaron en el método de sustitución porcentual de la ET, incluyendo sustituciones del 90%, 60%, 30% y 0% de la ET.

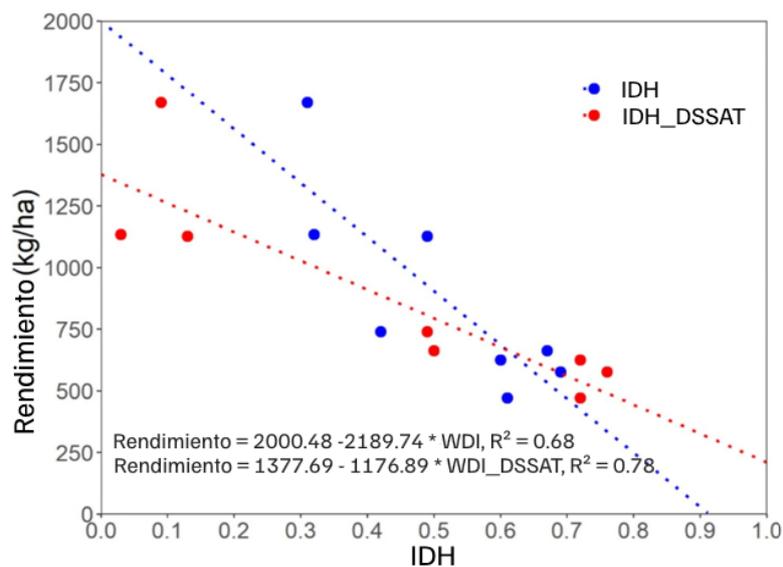


FIG. 10. Relaciones entre el Índice de Déficit Hídrico (IDH) promedio estacional, calculado directamente y simulado mediante el modelo de algodón DSSAT, y el rendimiento de algodón en rama. Los colores de las líneas representan el mismo método que el color del símbolo (utilizando datos de las temporadas de cultivo 2020 y 2021).

Se montó una plataforma de sensores (descrita en detalle en la subsección Procedimientos experimentales) **en el Pivot aproximadamente a 10 m de la segunda torre pivotante** (final), tal y como se muestra en la Fig. 1. La distancia entre las torres de Pivot era de 46 m (92 m de longitud total desde el punto de Pivot a la torre final), por lo que **los sensores se colocaron a unos 82 m del punto de Pivot**

central. De este modo, las longitudes de las parcelas individuales (la distancia que recorría el Pivot a través de 1/12 del campo en la posición en la que se montaba la plataforma del sensor) eran de aproximadamente 21,5 m de longitud. La anchura de la parcela era de aproximadamente 5 m, correspondiente al campo de visión de los sensores (Fig. 1).

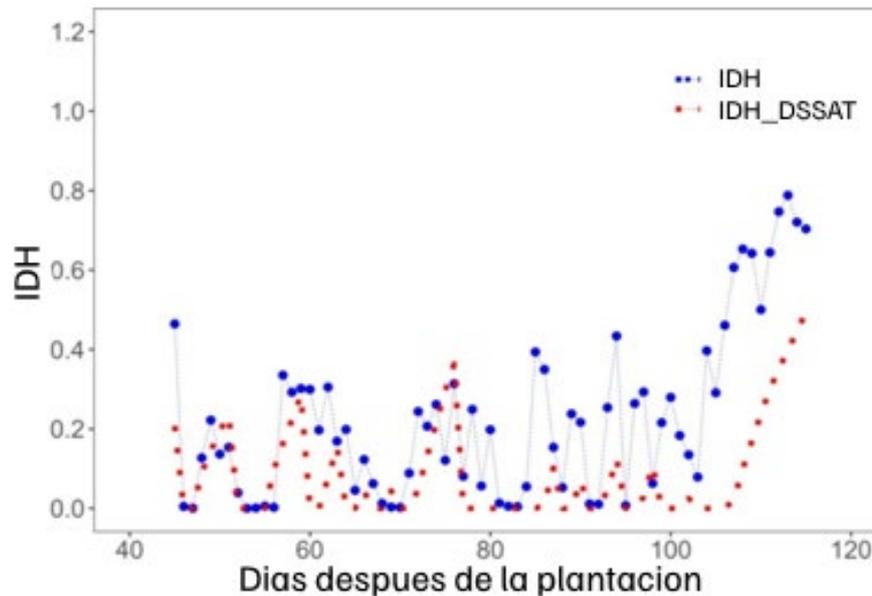


FIG. 11. Comparación del Índice de Déficit Hídrico (IDH) calculado directamente utilizando datos de campo de una estación terrestre y simulado utilizando el método de Balance Hídrico del Suelo en DSSAT para algodón gestionado con un 90% de sustitución de ET en el periodo vegetativo de 2021.

Procedimientos experimentales

Las 12 parcelas se sembraron con algodón “*Phytogen 350 W3FE*” (Corteva Agriscience, Indianapolis, IN, EE.UU.), una variedad de algodón comercial de maduración media, el 15 de junio de 2020 y el 27 de mayo de 2021. Las semillas de algodón se obtuvieron directamente de la empresa. La siembra se realizó con una sembradora de vacío de precisión a una tasa de siembra de 127.450 semillas ha⁻¹ y un espaciado entre hileras de 1,02 m con hileras rectas (es decir, **la siembra a través de las huellas de las ruedas del Pivot**). Se aplicó fertilizante (60-30-0) después de la siembra en ambos años a una dosis de 140 kg ha⁻¹. La tasa de riego semanal para cada tratamiento de sustitución de la ET se determinó utilizando la ET de referencia producida por una estación meteorológica estándar in situ (Campbell Scientific, Logan, UT) y los coeficientes de ET específicos de la fase de crecimiento publicados para el algodón. El riego se aplicó en una única dosis semanal, excepto cuando la prescripción de riego superó los 25 mm, entonces la cantidad se dividió en dos aplicaciones, separadas por tres o cuatro días. En 2020, todas las parcelas, incluidas las de sustitución de ET 0%, se regaron el 16 de julio para lavar el fertilizante aplicado. En 2021, la lluvia lavó el fertilizante el 16 de junio. Otras prácticas de gestión siguieron las recomendaciones regionales.

Como se ha descrito anteriormente y como se muestra en la Fig. 1, **se montó una plataforma de sensores en el Pivot de Chillicothe**, aproximadamente a 10 m proximal de la torre del segundo Pivot y a 4 m por

encima del suelo, para recoger datos del campo durante la temporada. La temperatura del estrato superior del cultivo del cultivo se midió con un radiómetro de infrarrojos SI-121-SS (Apogee Instruments, Logan, UT) con un campo de visión de medio ángulo de 18°. El índice espectral NDVI se midió con un par de sensores espectrales S2-112-SS (Apogee Instruments, Logan, UT) con un campo de visión de 30° (medio ángulo de 15°). Las mediciones de longitud de onda del sensor NDVI fueron de 650 ± 5 nm (rojo) y 810 ± 5 nm (infrarrojo cercano). Los sensores IRT y NDVI se fijaron a la varilla de soporte del Pivot en el lado de avance del Pivot. Los sensores se orientaron hacia abajo en un ángulo de 45°, lo que permitió realizar las mediciones sin interferencias de las operaciones de riego. A una altura de 4 m, apuntando hacia abajo a 45°, y con un campo de visión de medio ángulo de 18°, el campo de visión del sensor IRT llegaba hasta 2,04 m de distancia de la armadura del Pivot. Como se ha descrito anteriormente, la aplicación de agua de riego se prolongaba hacia el exterior sólo aproximadamente 1 m desde las cerchas del Pivot, por lo que no había solapamiento en las mediciones del riego y del sensor.

Se incluyó un sistema de antena inteligente Atlaslink GNSS (Hemisphere GNSS, AZ) para generar información de geolocalización de la plataforma de sensores, lo que permitió vincular las ubicaciones de los Pivots y las parcelas, y asignar los datos de los sensores a las respectivas parcelas y tratamientos. En 2021 (no en 2020), se añadió a la plataforma de sensores una mini-estación meteorológica ClimaVue50 todo en uno (Campbell Scientific, Logan, UT) para recoger datos de temperatura del aire, humedad, velocidad y dirección del viento, radiación solar y precipitaciones en la ubicación exacta de los sensores. También se colocó en el Pivot, pero cuidadosamente nivelado (es decir, no inclinado hacia abajo, como los demás sensores). Todos los instrumentos se conectaron a un controlador de registro de datos CR1000X (Campbell Scientific, Logan, UT), alimentado por una batería y un panel solar, que controlaba los sensores y almacenaba los datos que recogían. El registrador de datos se programó para realizar mediciones cada cinco segundos, que se promediaban y notificaban cada 30 s.

Los datos del sensor en Chillicothe se recogieron en recorridos en seco (sin que fluyera agua de riego) **mientras el Pivot estaba en movimiento** (la velocidad de funcionamiento se fijó en el 100%) dentro de las dos horas del mediodía. Los datos se recogieron los días, 7 de julio, 6 de agosto, 19 de agosto y 8 de septiembre de 2020, es decir, 35, 52, 65, 73 y 85 días después de la siembra. Del mismo modo, se recogieron datos los días 22 de julio, 31 de julio, 10 de agosto, 24 de agosto, 4 de septiembre y 6 de septiembre de 2021, lo que representa 57, 66, 76, 90, 101 y 103 días después de la plantación. También se colocó un conjunto de sensores similar en el suelo en una sola de las parcelas de sustitución del 90% de la ET, que incluía un sensor IRT y una estación meteorológica todo en uno (sin sensor NDVI). El sensor de temperatura se montó y ajustó a medida que el cultivo crecía para que apuntara hacia abajo en la parte superior de la cubierta vegetal. El sistema basado en el suelo se utilizó como una verdad limitada del suelo para las **mediciones de IDH basadas en el Pivot**, ya que el IDH podía determinarse en el suelo sin interferencias del fondo del mismo en el campo de visión del IRT.

Se utilizó un sistema aéreo no tripulado o UAS equipado con un sensor multispectral MicaSense RedEdge-MX (MicaSense, Seattle, WA, EE.UU.) para recopilar datos estándar de NDVI y el porcentaje de cobertura

del estrato superior del cultivo o Fc. El objetivo principal era generar datos Fc que pudieran utilizarse para generar una relación con el NDVI basado en Pivots para su introducción en el modelo IDH. El sensor del UAS tenía un tamaño de píxel de 3,75 µm, una resolución de 1280 × 960 píxeles y un campo de visión de 47,2 grados en horizontal y 35,4 grados en vertical. Las mediciones de longitud de onda del NDVI del sensor del UAS fueron de 668 ± 10 nm (rojo) y 842 ± 10 nm (infrarrojo cercano). El UAS se desplegó sobre las parcelas los días 22 de julio, 10 de agosto, 24 de agosto y 6 de septiembre de 2021 para recoger imágenes multiespectrales, **coincidiendo con las fechas en las que se recogieron datos con los sensores montados en los Pivots**. Todos los vuelos se realizaron dentro de las dos horas del mediodía a 30 m de altura para recoger imágenes multiespectrales de toda la parcela. La banda naranja mostrada en la Fig. 1 indica el área de la parcela considerada en el procesado de imágenes UAS, excluyendo las zonas límite entre parcelas. Las imágenes se procesaron utilizando Pix4D Mapper (Pix4D S.A., Prilly) para producir nubes de puntos densas y orto mosaicos, que se utilizaron para su posterior análisis en ArcMap 10.8.1 (ESRI, Redlands, CA). La herramienta de estadísticas zonales de ArcMap se utilizó para estimar el NDVI medio de cada parcela. La función de umbralización binaria de ArcMap, que utiliza el método de Otsu en combinación con la herramienta de estadísticas zonales, se utilizó para estimar el porcentaje medio de cobertura del estrato superior del cultivo (PCC)33 . **La relación entre el NDVI montado en el Pivot y el Fc basado en el UAS se determinó mediante regresión lineal.**

Las parcelas se cosecharon de forma mecánica cuando el cultivo maduró utilizando una máquina desmochadora de algodón de dos hileras equipada con un sistema de pesaje a bordo el 19 de noviembre de 2020 y el 11 de noviembre de 2021. Las muestras se desmotaron para eliminar los residuos y las semillas y determinar la producción de fibra, que se aplicó al peso total de la muestra de la parcela para determinar el rendimiento de fibra.

Determinación del índice de déficit hídrico

Para calcular el IDH se utilizaron los datos de temperatura superficial (Ts; estrato superior del cultivo y suelo), temperatura del aire (Ta), otros datos climáticos y la relación NDVI-cobertura del dosel, tal como describen Moran et al. y Colaizzi et al. La temperatura superficial tiene unos límites teóricos superior e inferior para un conjunto determinado de condiciones aerodinámicas y de radiación, que depende del agua disponible para transpiración y evaporación. La medición de Ts- Ta debe situarse entre los límites teóricos superiores e inferiores de temperatura. Tras estimar los límites superiores e inferiores, el IDH se calculó de la siguiente manera:

$$IDH = \frac{(Ts - Ta)_{\text{Recursos}} - (Ts - Ta)_{\text{Límite inferior}}}{(Ts - Ta)_{\text{Límite Superior}} - (Ts - Ta)_{\text{Límite inferior}}} \quad (1)$$

Donde (Ts- Ta) *límite inferior* y (Ts- Ta) *límite superior* eran estimaciones teóricas para condiciones húmedas y secas, respectivamente. Suponiendo que Ts- Ta es una función lineal de la cobertura del estrato superior del cultivo o Fc, las temperaturas de la superficie menos la del aire de una superficie de vegetación de

cobertura total $[(Ts - Ta)_{vegetación}]$, y la superficie de suelo desnudo $[(Ts - Ta)_{suelo descubierto}]$, los límites teóricos superiores e inferiores de temperatura pueden calcularse utilizando las ecuaciones (2) y (3):

$$(Ts - Ta)_{\text{Limite inferior}} = Fc(Ts - Ta)_{\text{Vegetacion humeda}} + (1 - Fc)(Ts - Ta)_{\text{Superficie humeda}} \quad (2)$$

$$(Ts - Ta)_{\text{Limite superior}} = Fc(Ts - Ta)_{\text{Vegetacion seca}} + (1 - Fc)(Ts - Ta)_{\text{Superficie seca}} \quad (3)$$

La “vegetación húmeda” indica una cubierta vegetal bien regada y la “vegetación seca” indica una cubierta vegetal completamente estresada por el agua. El “suelo húmedo” indica un suelo saturado, y el “suelo seco” indica una superficie de suelo seco sin cubierta vegetal. **La relación entre el sensor NDVI montado en el Pivot y el porcentaje de cobertura del estrato superior del cultivo** establecida en la temporada 2021 ($y = 0,9449x + 0,1539$; Fig. 2) se utilizó para calcular Fc para cada observación. Para calcular el IDH de la estación terrestre de Chillicothe, se supuso que Fc era 1,0. Se utilizaron ecuaciones de balance de energía para estimar el Ts- Ta para vegetación húmeda, suelo húmedo, vegetación seca y suelo seco, como se describe en Colaizzi et al. y Virlet et al:

$$(Ts - Ta)_{\text{Vegetacion humeda}} = \frac{r_{a1}(R_{n1} - G_1)}{\rho_a C_p} * \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_{cp}}{r_{a1}}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{cp}}{r_{a1}}\right)} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{cp}}{r_{a1}}\right)} \quad (4)$$

$$(Ts - Ta)_{\text{Vegetacion seca}} = \frac{r_{a1}(R_{n2} - G_2)}{\rho_a C_p} * \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_{cx}}{r_{a2}}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{cx}}{r_{a2}}\right)} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{cx}}{r_{a2}}\right)} \quad (5)$$

$$(Ts - Ta)_{\text{Superficie humeda}} = \frac{r_{a2}(R_{n3} - G_3)}{\rho_a C_p} * \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma} \quad (6)$$

$$(Ts - Ta)_{\text{Superficie seca}} = \frac{r_{a2}(R_{n4} - G_4)}{\rho_a C_p} \quad (7)$$

Donde r= resistencia aerodinámica (s m-1); R= radiación solar neta recibida (W m-2); G= densidad del flujo térmico del suelo (Wm-2); ρ_a = densidad del aire seco (kg m-3); C_p = calor específico del aire seco (1. 013 kJ kg-1 °C-1); γ = constante psicrométrica (kPa °C-1); Δ = pendiente de la relación presión de vapor saturado-temperatura (kPa °C-1); r_{cp} y r_{cx} = resistencia del estrato superior del cultivo c_x en el estrato superior del cultivo bien regado y en el estrato superior del cultivo completamente estresado, respectivamente (s m-1); y VPD=m déficit de presión de vapor (kPa). Los parámetros r_a , R_n , ρ_a , γ , Δ y VPD se calcularon a partir de ecuaciones de la base de datos FAO 56. Para calcular r_{a1} , se supuso que la altura media del estrato superior del cultivo de algodón era de 90 cm y r_{a2} se calculó para el suelo descubierto. Para calcular R_n , se asumió que el albedo superficial para el suelo Grandfield de arena fina (franco fino, mixto, superactivo, térmico Typic Haplustalfs) en Chillicothe, TX era de 0,23, 0,23, 0,16 y 0,23 para vegetación húmeda, vegetación seca, suelo descubierto húmedo y suelo descubierto seco respectivamente, según Fontes. Los valores de r_{cp} y r_{cx} utilizados en otros estudios también han variado. Moran et al. sugirieron utilizar r_{cp} dentro del rango de 25-100 s m-1 y r_{cx} dentro del rango de 1000-1500 s m-1 para que la resistencia del estrato superior del cultivo sea muy grande o pequeña en relación con r Colaizzi et al.25 a. asumieron que r_{cp} y r_{cx}

eran de 10 y 250 s m⁻¹, respectivamente, para el algodón. En este estudio, se supuso que los valores de r_{cp} y r_{cx} eran de 20 y 650 s m⁻¹.

La Resistencia Aerodinámica (r_a) se estimó utilizando la Ecuación 8 de Allen et al.

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{Z_m - d}{Z_{om}} \right] \ln \left[\frac{Z_e - d}{Z_{ov}} \right]}{K^2 U_z} \quad (8)$$

Donde, Z_m y Z_e son las alturas para las mediciones del viento y la humedad que era igual a 2 m. D = 0,67* altura media del estrato superior del cultivo (h_c) es la altura de desplazamiento del plano cero en la que la velocidad del viento se considera nula. Z_{om} = 0,123h_c, es la altura de rugosidad que rige la transferencia de calor y vapor. K= 0,41 es la constante de von Karman. U_z es la velocidad del viento (ms⁻¹) a 2m de altura. Para un suelo desnudo d= 0, Z_{om}= 0,01m.

Comparación de los resultados de los IDH con los del modelo DSSAT

Las herramientas de programación del riego basadas en sensores pueden determinar eficazmente el momento del riego, pero no estiman directamente la cantidad de agua que debe aplicarse. Por ello, estas herramientas suelen integrarse con otros métodos, como los modelos de cultivo, para permitir la programación del riego en tiempo real. Por ejemplo, el Modelo de Sistema de Cultivo (CSM) del Sistema de Apoyo a las Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT), que simula el estrés hídrico basándose en el balance hídrico del suelo, se ha utilizado ampliamente en la programación del riego.

Con una calibración adecuada, el DSSAT CSM puede utilizarse para simular el crecimiento de los cultivos y programar el riego integrando datos meteorológicos, genéticos de los cultivos, de propiedades del suelo y de gestión de los cultivos. Los datos meteorológicos necesarios para la calibración del modelo incluyen temperaturas máximas y mínimas diarias, precipitaciones, radiación solar y velocidad del viento, que se obtuvieron de varias fuentes, incluyendo DAYMET (1996-2000) (<https://daymet.ornl.gov/>), la red Texas High Plains ET (TXHPET) Network (2000-2012) (Porter et al., 2005), la estación meteorológica West Texas Mesonet en Odell, Texas (2013-2017) (<http://www.mesonet.ttu.edu/meteograms/>), y la estación meteorológica in situ (2018-2020). Los datos del suelo, incluidos la textura del suelo, la densidad aparente, el contenido de carbono orgánico, el nitrógeno total, la capacidad de intercambio catiónico, los niveles de pH, el contenido de agua saturada, la conductividad hidráulica, la capacidad de campo (es decir, el límite superior drenado en DSSAT), el punto de marchitez (es decir, el límite inferior en DSSAT) y el factor de crecimiento de las raíces del suelo, se determinaron sobre la base de mediciones previas in situ. La información sobre las prácticas de gestión de los cultivos, incluidas las fechas de siembra y cosecha, la labranza, la aplicación de fertilizantes y pesticidas, y el riego, se obtuvo a partir de las prácticas adoptadas en el experimento de campo.

Los coeficientes del genotipo del algodón se ajustaron durante la calibración del modelo. El módulo DSSAT CROPGRO-Algodón fue calibrado y validado previamente para el mismo sitio de estudio por Adhikari et al. utilizando datos medidos de un experimento de cultivo de cobertura realizado de 2011 a 2015, con un error porcentual promedio en la predicción del rendimiento de algodón en semilla de -10,1% y -1,0% durante los períodos de calibración y validación, respectivamente. Además, el agua del suelo simulada en diferentes perfiles de profundidad del mismo (es decir, 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm y 80-140 cm) coincidió bien con el agua del suelo medida durante los períodos de calibración y validación, con R2 que osciló entre 0,45 y 0,89 para los campos de algodón de regadío. Himanshu et al. validaron además el modelo utilizando datos para un período ampliado de 2011 a 2020. La comparación del contenido de agua del suelo simulado y medido, el rendimiento de algodón en semilla y el contenido de carbono orgánico del suelo se muestran en la información complementaria (Figuras S1 y S2), con detalles de calibración disponibles en Adhikari et al. y Himanshu et al.

Ale et al. llevaron a cabo además una evaluación exhaustiva del modelo DSSAT calibrado, haciendo hincapié en su capacidad para predecir con exactitud el rendimiento del algodón en rama, y la cantidad y el momento del riego a través de diversas estrategias de riego. Esta evaluación empleó una simulación de 30 años (1991-2020), probando el modelo sobre una gama de tratamientos de sustitución de ET (es decir, 0%, 30%, 60%, 90% y 100% de sustituciones de ET). Los resultados de esta amplia evaluación sugieren que DSSAT posee una sólida capacidad para simular con precisión las cantidades de riego necesarias, adaptándose eficazmente a diversos escenarios meteorológicos y estrategias de riego.

El modelo DSSAT simula el estrés hídrico analizando el balance hídrico del suelo, que está directamente correlacionado con el IDH. El coeficiente de estrés hídrico (K_s) representa la relación entre las tasas de transpiración real y potencial en los cultivos, y varía de 1,0 a 0 en respuesta al grado de estrés hídrico. En condiciones en las que la humedad del suelo es insuficiente, los valores de K_s caen por debajo de 1, lo que indica una transpiración reducida debido al estrés hídrico. En situaciones extremas, cuando la humedad del suelo se aproxima al punto de marchitamiento y las plantas son incapaces de extraer agua, los valores de K_s se aproximan a 0. Esta dinámica pone de relieve la relación inversa entre el IDH y K_s . Mayores niveles de estrés hídrico dan lugar a valores más bajos de K_s , mientras que simultáneamente conducen a valores más altos de IDH. La relación entre IDH y K_s puede expresarse como:

$$IDH = 1 - K_s \quad (9)$$

K_s se puede calcular:

$$K_s = \frac{ATD - D_r}{ATD - ARD} \quad (10)$$

Donde D es el agotamiento de la zona radicular en mm, ATD es el total de agua del suelo disponible en la zona radicular en mm, y ARD es el agua fácilmente disponible en mm. D , ATD y ARD se simularon utilizando

un módulo calibrado CROPGRO-Algodón del modelo DSSAT. Para el cálculo se utilizaron las tres capas superiores del archivo de suelos de DSSAT (es decir, 0-5 cm, 5-15 cm y 15-30 cm).

Análisis Estadístico

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software SAS 9.4 (SAS Institute, Cary, NC). Se utilizó la regresión lineal para establecer la relación entre el Fc medido por el UAS y el NDVI medido por un sensor NDVI **montado en un Pivot utilizando el procedimiento PROC REG**. También se utilizó el procedimiento PROC REG para evaluar las relaciones y la variabilidad de los parámetros meteorológicos (radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa, temperatura del aire y precipitaciones) entre las distintas estaciones meteorológicas y entre las mediciones del IDH en cada sitio. Los datos sobre IDH y rendimiento de fibra se analizaron mediante ANOVA utilizando el procedimiento PROC GLIMMIX, manteniendo el bloque como efecto aleatorio y el riego como efecto fijo en el modelo. Las comparaciones post-hoc de medias se realizaron mediante el método Tukey con un umbral estadístico de $P \leq 0,05$.

Las comparaciones del IDH calculado a partir del método basado en sensores y los simulados por el modelo DSSAT se realizaron utilizando tres estadísticas de rendimiento del modelo, incluyendo el coeficiente de determinación (R^2), el índice de acuerdo (índice d) y el porcentaje de error cuadrático medio (RMSE).

MEDICIÓN DE LOS IDH EN LOS CAMPOS DE PRODUCCIÓN DE ALGODÓN

En 2021, se seleccionaron dos campos de producción de algodón propiedad de los productores y **gestionados por ellos con sistemas de riego por Pivot** en el condado de Hardman, TX, EE.UU. (Pivot de producción 1: 34°12'22" N, 99°30'59" O y Pivot de producción 2: 34°14'10" N, 99°30'24" O) para recopilar datos mediante los sensores montados en Pivots. Los Pivots de Producción 1 y 2 estaban situados aproximadamente a 1,5 y 5 km, respectivamente, de la Estación de Investigación de Chillicothe (es decir, el lugar del estudio de dos años sobre la tasa de riego). La gestión de los cultivos de estos campos era uniforme en sus respectivas zonas y el enfoque de la recogida de datos de los sensores era observacional, por lo que no había tratamientos experimentales. **El Pivot de producción 1 era un sistema de cinco torres** (61 m de envergadura; 305 m de longitud total **desde el punto de Pivot hasta la torre final**) y **el Pivot de producción 2 era un sistema de siete torres** (53 m de envergadura; 373 m de longitud total **desde el punto de Pivot hasta la torre final**).

Se desplegaron plataformas de sensores en los Pivots de Producción 1 y 2 que incluían los mismos componentes y la misma configuración general que la plataforma utilizada en el estudio de dos años en la Estación de Investigación de Chillicothe, incluidas las mini-estaciones meteorológicas, pero excluidos los sistemas GNSS. Las plataformas de sensores se montaron igualmente a unos 10 m proximales de las torres de Pivots finales, con los sensores colocados en las varillas de la armadura orientadas hacia delante apuntando hacia abajo en un ángulo de 45°. El intervalo de registro de datos se fijó en 30 minutos. Al igual que el Pivot de Chillicothe, los Pivots de producción 1 y 2 tenían emisores LEPA modificados, y las

operaciones de riego no influyeron en las mediciones de los sensores. **En el caso de estos Pivots**, los datos se recogieron principalmente mientras el sistema regaba activamente. La salida de datos de las plataformas se utilizó para calcular el IDH utilizando el mismo procedimiento descrito anteriormente.

Todas las decisiones relativas a la gestión del cultivo, incluidas el momento y las cantidades de riego, fueron tomadas por el productor de algodón. Ambos campos de producción se plantaron con la variedad de algodón de maduración temprana-media "*Phytogen 400 W3FE*" el 24 de mayo de 2021 con una separación entre hileras de 1,02 m. Se aplicó un total de 198 mm y 218 mm de agua de riego durante la temporada de cultivo del algodón en el Pivot de producción 1 y el Pivot de producción 2, respectivamente. En ambos lugares de producción, **los Pivots eran sectoriales (es decir, no de círculo completo)**, lo que limitaba la cantidad de datos de los sensores que podían utilizarse. Los datos se filtraron para mantener sólo los datos cuando los Pivots estaban regando (girando hacia delante) o estaban estacionados en el lado este de los campos con los sensores apuntando hacia el estrato superior del cultivo del algodón. **Cuando los Pivots estaban estacionados en los lados oeste de los campos**, los sensores apuntaban a las malas hierbas a lo largo de las líneas de la valla.