

SIMULACIONES DEL USO DEL AGUA PARA INTENSIFICAR CULTIVOS EN SIEMBRA DIRECTA

Luis R. Salado Navarro Ing. Agr., M.Sc., Ph.D. (1)

INTRODUCCION

La producción de granos en Argentina debe incrementarse, para generar mayores saldos exportables y satisfacer la creciente demanda mundial de alimentos. Esto puede lograrse, haciendo dos cultivos anuales en gran parte de la Región Pampeana Húmeda. Pero es necesario, estimar las implicancias de la intensificación de cultivos a largo plazo, para saber cómo afectaran estas prácticas a la sustentabilidad del sistema ecológico. Este objetivo demandaría décadas en un trabajo de campo, pero puede hacerse en poco tiempo, con modelos de simulación de cultivos.

Este trabajo se realizó con los modelos de simulación de cultivos de Sinclair (1992 y 2003), que fueron utilizados con éxito en varios países y especialmente en Argentina (Sinclair y otros, 1992; 2007; Salado Navarro y Sinclair, 2009, 2013), para analizar las relaciones entre los rendimientos de soja y de rotaciones con el contenido hídrico del suelo en Siembra Directa. También fueron utilizados recientemente para analizar la evaporación de barbechos en Siembra Directa (Salado Navarro y otros, 2013).

Las napas freáticas cercanas a la superficie del suelo, constituyen un grave problema desde hace años para la agricultura en la Región Pampeana Húmeda. Martini y Baigorri (2002), señalaron que había 5 millones de hectáreas afectadas por este fenómeno hace tres lustros. Con los modelos de Sinclair, se puede estimar los volúmenes percolados hacia las napas, durante los barbechos y cultivos.

En este trabajo se realizaron simulaciones seriadas del monocultivo de soja y tres rotaciones con trigo y maíz, durante 26 campañas agrícolas (1990-2016), en Marcos Juárez, una localidad típica de la región. Se usaron los modelos de cultivos de Sinclair, para estimar la sustentabilidad ecológica de las rotaciones de doble cultivos anuales debido a: 1) los rendimientos alcanzables en secano, 2) su limitación por el estrés hídrico, 3) el uso del agua de lluvia y la eficiencia de su utilización, y 4) la percolación del agua sobrante hacia las napas freáticas.

MATERIAL Y METODOS

Usando los modelos de cultivos de soja, maíz y trigo de Sinclair adaptados a Siembra Directa, se simularon en forma continua los cultivos y barbechos durante 26 campañas, y se estimaron los rendimientos alcanzables en secano, los balances hídricos, incluyendo la evaporación, transpiración, percolación y contenido de agua útil del perfil de suelo hasta una profundidad de 1,5 m, en Marcos Juárez, Córdoba, para: A) Monocultivo de soja, B) Doble cultivo trigo-soja, C) La rotación de dos años trigo-maíz-soja de primera y D) La rotación de dos años trigo-soja-trigo-maíz.

En los casos de las rotaciones bianuales, se simularon las rotaciones complementarias, para tener los cultivos estivales todos los años. Esto es, como si hubiera un campo dividido en dos lotes y en cada

campaña un lote tuvo trigo-maíz y el otro trigo-soja. Los barbechos entre cultivos fueron simulados con un modelo de Sinclair modificado, donde se anularon las rutinas de los cultivos.

(1) Irsaladonavarro@gmail.com

Para las simulaciones, se usaron los datos meteorológicos diarios de temperaturas máximas y mínimas, radiación solar y precipitaciones, de la estación meteorológica de la EEA Marcos Juárez, provistos por INTA. Para el cálculo del balance hídrico del perfil del suelo, se usó la capacidad volumétrica del 20% de retención de agua de la Serie de Suelos Marcos Juárez.

Los ciclos de los cultivares simulados fueron: Soja Grupo IV Largo; Maíz ciclo Completo y Trigo ciclo largo después de soja y ciclo intermedio después de maíz. Las fechas de siembra usadas fueron: Soja de 1ra.: 20 de octubre; Soja y Maíz de 2da.: 20 días después de la madurez fisiológica del trigo; Trigo después de soja y maíz: 25 de mayo y 10 de junio, respectivamente. Las densidades usadas fueron: 30, 75 y 300 plantas por hectárea para soja, maíz y trigo, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSION

Régimen Hídrico

Las lluvias del periodo simulado (1990-2016), en Marcos Juárez, promediaron 889 mm por campaña, con un máximo y mínimo de 1205 y 550 mm, respectivamente. La Desviación Estándar de 204 mm, evidenció la gran variabilidad de las lluvias entre campañas. También se registró una gran variabilidad de las lluvias inter campaña, es decir las precipitaciones en un mismo mes en distintas campañas. El periodo más lluvioso se registró entre noviembre y marzo.

Rendimientos de Cultivos

En las simulaciones los rendimientos alcanzables en secano de soja, maíz y trigo fueron limitados por: a) el agua útil diaria del perfil de 1,5 m de profundidad; b) las temperaturas; c) la radiación solar y d) el déficit de presión de vapor de la atmósfera, estimado por los modelos. Es decir, que no se simuló la influencia de plagas, enfermedades o déficit nutricionales u otros factores edáficos. En la Tabla 1, se exponen los rendimientos simulados promedios (Kg/Ha.), de los cultivos y rotaciones. Las desviaciones estándar, indican que la variabilidad interanual de los rendimientos de soja y trigo fue menor en la rotación de dos años Trigo-Maíz-Soja de 1ra.

	SOJA MONOC.	TRIGO-SOJA	TRI-MA-SO1RA	TR-SO-TR-MA
SOJA PROMEDIO	4641	4090	5026	4213
SOJA DESV. EST.	1250	1217	812	1024
MAIZ PROMEDIO	---	---	11797	11783
MAIZ DESV. EST.	---	---	1319	1444
TRIGO PROMEDIO	---	5180	5674	5448
TRIGO DESV. EST.	---	1428	977	1292

Tabla 1. Rendimientos simulados alcanzables en secano (Kg/Ha.), en Marcos Juárez en el periodo 1990-2016, por el monocultivo de soja y las rotaciones con trigo y maíz.

Los valores de los rendimientos simulados, alcanzables, estimados en seco, coinciden con los obtenidos en ensayos experimentales en la EEA de INTA Marcos Juárez. En el caso de maíz, los rendimientos de ensayos fueron reportados por Vallone y otros (2015). En soja por la Red RECSO y en trigo figuran en la página web del INASE. Si bien los valores promedios finales de los rendimientos simulados entre el monocultivo y entre rotaciones, no difieren significativamente, se observan tendencias similares a las obtenidas en ensayos de campo (Tabla 1). En el caso de soja de 1ra./maíz fueron casi 4 y 10 quintales superiores al mono y doble cultivos, respectivamente. En la única alternativa simulada de maíz (de 2da), los rendimientos coinciden, casi exactamente con los reportados por Vallone (2015). En trigo, se observó una tendencia a mayores rindes, cuando participó el maíz en la rotación. En la Fig. 1, se presentan los rindes de soja en los distintos planteos simulados, en la ordenada se graficaron los porcentajes de la probabilidad de obtener un mayor valor. Por ejemplo, se nota claramente que, en 26 campañas la soja/maíz rindió más que soja/trigo.

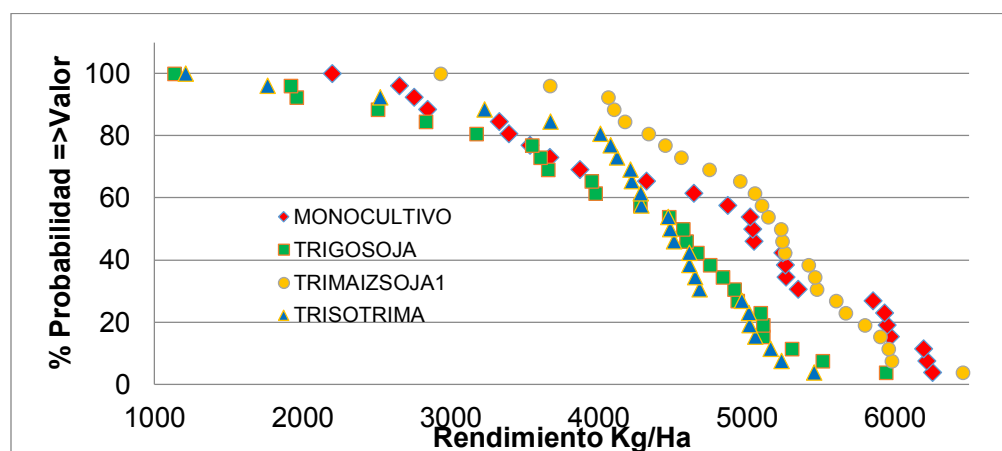


Fig. 1. Rendimientos de soja simulados alcanzables en seco en 26 campañas, de monocultivo y de rotaciones con trigo y maíz en Marcos Juárez.

En la Tabla 2 se muestran los rendimientos máximos y mínimos simulados para los tres cultivos en distintos planteos de siembra. Estos resultados indican, que bajo el punto de vista de los rendimientos simulados alcanzables en seco, la producción de doble cultivos anuales, es sustentable a largo plazo en Marcos Juárez, porque el periodo simulado abarcó años secos y húmedos.

	MONO		TRIGO-SOJA		TR-MA-SO		TR-SO-TR-MA	
	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX	MIN.
SOJA	6255	2201	5937	1134	6457	2929	5453	1208
TRIGO	---	---	6966	445	7015	3245	7142	760
MAIZ	---	---	---	---	13481	8179	13481	8107

Tabla 2. Rendimientos simulados alcanzables en seco (Kg/Ha), de tres cultivos en diferentes planteos de siembra en M. Juárez, en 26 campañas.

Estrés Hídrico

La Fracción de Agua Útil (FAU) del perfil del suelo simulada es el porcentaje entre la capacidad de campo y la marchitez permanente, a través del ciclo de los cultivos. Este parámetro del suelo, es más útil que el contenido hídrico expresado en mm, porque al ser un porcentaje, la FAU es un indicador normalizado a través de suelos con diferentes texturas. Sinclair (1986), determinó que la tasa de fijación simbiótica de nitrógeno en soja, declina rápidamente cuando la FAU es menor a 66 %. En forma similar Ray y Sinclair (1998), encontraron que la tasa fotosintética en soja y maíz declina cuando la FAU es menor a un tercio. Por consiguiente, la soja es más susceptible al estrés hídrico que el maíz.

En campañas con diferentes rendimientos, la FAU simulada de soja, mostró que hay diversos periodos en que los cultivos con rendimientos medios o bajos, estuvieron sometidos a estrés hídrico (Fig. 2). En efecto, la FAU de la soja que rindió 62 Qt/Ha estuvo siempre por encima del 40% y solo un corto periodo cercano a la madurez, por debajo del 60%. Por consiguiente, en esta soja la fijación de nitrógeno fue la única que sufrió estrés hídrico, ya que la fotosíntesis no fue estresada. En los trigos y maíces simulados, se observaron tendencias similares en cultivos de diferentes rendimientos. Por consiguiente, estas simulaciones, indican que el estrés hídrico en secano, es un importante depresor del rendimiento, especialmente en soja, aunque se manifieste durante cortos periodos del ciclo de cultivo. El estrés hídrico redujo el ciclo de los cultivos como se observa en la Fig. 2.

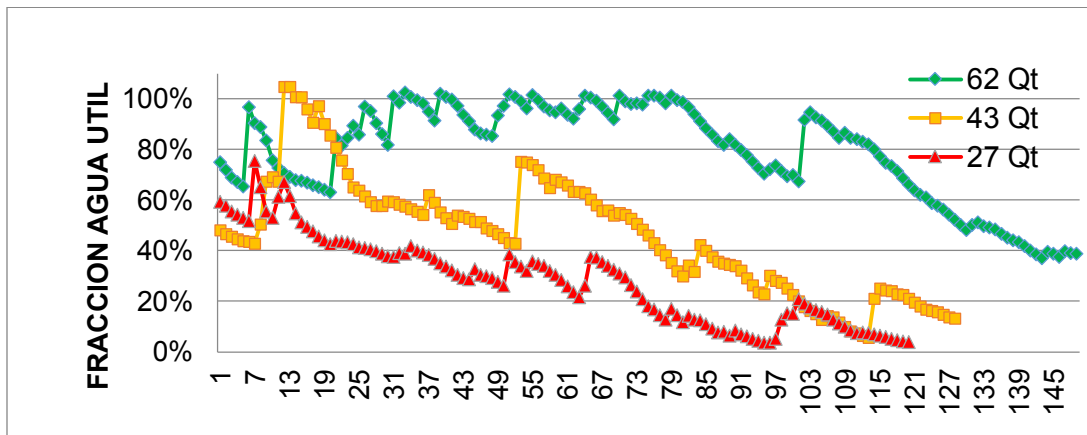


Fig. 2. Balance Hídrico simulado del ciclo en tres cultivos de soja con rendimientos contrastantes, en función de La Fracción de Agua Útil (FAU), del perfil de 1.5m de profundidad del suelo en M. Juárez.

Eficiencia del Uso del Agua

La Eficiencia del Uso del Agua (EUA), estimada como el cociente entre los kilogramos del rendimiento de granos divididos por los milímetros de agua evapotranspirada, es un parámetro que evidencia las eficiencias entre cultivos, en el agua requerida para su producción. En la Tabla 3, se observan las EUA simuladas para soja, maíz y trigo, en diferentes sistemas de cultivos.

	SOJA MONOC.	TRIGO-SOJA	TR-MA-SOJA1RA	TR-SO-TR-MA
SOJA PROMEDIO	7.6	8.4	8.9	9.2
SOJA DESV. EST.	1.33	1.69	1.03	1.43
TRIGO PROMEDIO	---	18.6	19.0	18.7

TRIGO DESV. EST.		3.38	2.50	3.10
MAIZ PROMEDIO	---	---	26.6	26.5
MAIZ DESV. EST.	---	---	1.77	1.54

Tabla 3. Eficiencia del Uso del Agua (EUA), simulada (kg granos/mm agua evapotranspirada), del monocultivo de soja y tres rotaciones con trigo y maíz, en 26 campañas en Marcos Juárez, Córdoba.

La EUA es mínima en soja, intermedia en trigo y máxima en maíz. Esto se debe, a la diferencia en la composición energética de estos granos, ya que la síntesis de proteína y aceite en soja, requiere mucho más energía, que la de carbohidratos en maíz. Por otra parte, se trata de dos cultivos con sistemas energéticos diferentes (C3 y C4). La EUA de soja aumentó significativamente en las rotaciones, comparada con el monocultivo (Tabla2). En el caso de trigo y maíz, no hubo diferencias entre las rotaciones. Por consiguiente, estos resultados simulados, señalan que la intensificación de cultivos a largo plazo, tendería a aumentar la eficiencia del uso del agua en soja.

Evaporación y Transpiración de Cultivos

Con los modelos de simulación de Sinclair, se estimó la evaporación y la transpiración de los tres cultivos estudiados. En la Tabla 4, se muestran los valores promedio obtenidos, para la rotación de dos años TRIGO-SOJA-TRIGO-MAIZ y los desvíos estándares en los 26 años simulados. Las evaporaciones y transpiraciones promedio en esta rotación, fueron similares en soja y maíz, y también entre los trigos después de soja y maíz.

mm/Campaña	SOJA 2da.		TRIGO/SOJA		MAIZ 2da.		TRIGO/MAIZ	
	EVAP.	TRAN.	EVAP.	TRAN.	EVAP.	TRAN.	EVAP.	TRAN.
MEDIA	109.5	339.2	35.6	255.3	114.6	332.2	34.3	256.9
DES. EST.	35.25	50.90	14.30	64.29	33.67	36.05	17.57	67.32

Tabla 4. Evaporación y Transpiración promedio simulada (mm/campaña), de cultivos en la rotación de dos años TRIGO-SOJA-TRIGO-MAIZ, para 26 campañas en Marcos Juárez.

En la Tabla 5, se presentan los porcentajes promedio de evapotranspiración respecto a la lluvia anual, en el monocultivo de soja y en las rotaciones simuladas. Estos valores no incluyen a la evaporación y percolación de los barbechos intermedios. Los dobles cultivos anuales utilizan mayores porcentajes del agua útil que un solo cultivo anual.

	MONOCUL. SOJA	TRIGO-SOJA	TRI-MA-SOJA1ra	TRI-SO-TRI-MA
% EVAPOTRANSPIRADOS	70	87	74	83

Tabla 5. Porcentajes promedio de la lluvia evapotranspirados por el monocultivo y las rotaciones simuladas para Marcos Juárez durante 26 campañas.

Percolación hacia la Napa Freática

La percolación de los excesos hídricos, constituye un grave problema en millones de hectáreas de la Pampa Húmeda, donde la napa freática, se encuentra muy cercana a la superficie. Bollatti y Andreucci (2015), mostraron la dramática suba de la napa freática en Marcos Juárez, desde los 70' cuando estaba a más de 10 m y ahora está a 1.5 m de profundidad. Es importante conocer entonces cuales cultivos y rotaciones percolan más, a través de muchos años secos y húmedos, agravando este serio problema. Las simulaciones mostraron como se ve en la Tabla 6, que la percolación en la rotación TRI-MA-SOJA1ra. fue máxima y más del doble que en el monocultivo de soja mientras que Trigo-Soja y TRI-SO-TRI-MA

CULTIVOS	SOJA MONOC.	TRIGO-SOJA	TRI-MA-SOJA1	TRI-SO-TRI-MA
PERCOLACION mm	871	944	1940	1222

Tabla 6. Percolación total simulada hacia la napa freática, por el monocultivo de soja y las rotaciones en 26 campañas en Marcos Juárez.

tuvieron valores de percolación intermedios. Para analizar en detalle la máxima percolación de la rotación TRI-MA-SOJA1ra, se comparan las percolaciones de la Soja de 1ra sobre maíz, que fue un 47 % mayor que la Soja/Soja en el monocultivo en la siguiente tabla (7). También el barbecho largo después de maíz, en la rotación TRI-MA SO1ra percoló más del doble (419 mm), que la del barbecho largo del Monocultivo de Soja (203 mm). Esto se repitió en los barbechos cortos de la rotación TRI-SO-TRI-MA, allí la percolación total fue 85.25 y 248.7 mm, respectivamente en nlos barbechos de soja y maíz.

CULTIVOS	SOJA/SOJA	SOJA/MAIZ
PERCOLACION TOTAL mm	668	982

Tabla 7. Percolación simulada total en 26 campañas para el Monocultivo de Soja vs. Soja de 1ra. de la rotación TRI-MA-SOJA1ra. en Marcos Juárez.

Para desentrañar la causa de las mayores percolaciones del barbecho posterior al maíz y del subsiguiente cultivo de soja de 1ra, se presentan las evaporaciones de ambos, comparadas con las del barbecho y monocultivo de soja en la Tabla 8. Se observa que después del maíz, el barbecho y el cultivo siguiente de soja/maíz, evaporan 70% menos, que el barbecho del monocultivo y la soja/soja. La menor evaporación que se registró en los barbechos y cultivos, después de maíz, implican que los suelos tienen mayores contenidos hídricos que los sembrados con soja. En consecuencia, estos suelos se saturan más rápidamente que los de soja ante una precipitación copiosa, y percolan mayores volúmenes de agua hacia la napa que los suelos sojeros.

	BARBECHOS		CULTIVOS	
PROMEDIO	MONOCULT.	TRI-MA-SO1ra	MONOCULT.	TRI-MA-SO1ra

EVAPORACION	SOJA/SOJA	MAIZ/TRIGO	SOJA/SOJA	SOJA/MAIZ
(mm/CAMPANA)	256.6	154.9	163.9	91.4

Tabla 8. Evaporación simulada promedio de 26 campañas en barbechos y cultivos

En conclusión, las simulaciones de más de cinco lustros señalan que, el monocultivo de soja evapora un mayor porcentaje de agua de lluvia que los doble cultivos y mantiene el suelo con menores tenores hídricos que, cuando ocurren lluvias copiosas, producen menores percolaciones en el largo plazo. Los doble cultivos son más eficientes, porque utilizan una mayor proporción de la lluvia y sobre todo después de maíz, la evaporación es reducida, el tenor hídrico del suelo es mayor y por ende la percolación a la napa es muy superior que la del monocultivo. La percolación a las napas, es el mayor riesgo a la sustentabilidad de la agricultura en Siembra Directa, en la Pampa Húmeda.

CONCLUSIONES

Las simulaciones de rendimientos y uso del agua del monocultivo de soja y rotaciones continuas con trigo y maíz, para M. Juárez durante 26 campañas (1990-2016), con los modelos de Sinclair indican que:

- 1) Las lluvias reales registradas entre campañas promediaron 889 mm y fueron muy variables.
- 2) Los rendimientos promedios en secano de Soja fueron entre 40 y 50 Qt/Ha, mínimos en TR-SO, máximos en TR-MA-SO1ra e intermedios en TR-SO-TR-MA.; de Trigo entre 51 y 56 Qt/Ha mínimos en TR-SO, máximos en TR-MA-SO1ra e intermedios en TR-SO-TR-MA; en Maíz fueron iguales 118 Qt/Ha en rotaciones de dos años.
- 3) El Estrés Hídrico, fue el principal depresor de los rendimientos en secano, de los tres cultivos y afecta más a soja, en todos los sistemas estudiados.
- 4) La Eficiencia del Uso del Agua (Kg granos/mm agua evapotransp.), fue 7.6 y 8.4 para soja de 1ra y 2da, 19.0 en trigo y 26.5 en maíz 2da.
- 5) Los porcentajes promedio de agua de lluvia evapotranspirados fueron: Monocultivo Soja (70); TR-SO (87); TR-MA-SO1ra (74) y TR-SO-TR-MA (83).
- 6) La evaporación promedio del Barbecho y Monocultivo Soja (257 y 164 mm) fue 70% mayor que en barbecho Maíz y Soja/Maíz en TR-MA-SO1ra (164 y 91 mm), respectivamente.
- 7) La percolación total a la napa freática fue máxima para TR-MA-SO1ra (1940 mm); mínima en Monocultivo (871 mm); intermedia en TR-SO (944 mm) y TR-SO-TR-MA (1222 mm).
- 8) Existe una relación inversa entre la evaporación (Mínima) y la percolación (Máxima) después del Maíz versus la evaporación (Máxima) y Percolación (Mínima) del Monocultivo Soja.
- 9) En síntesis, la PERCOLACION hacia la napa de los cultivos y rotaciones, sobre todo en SOJA/MAIZ es el mayor riesgo a la sustentabilidad de la agricultura en Siembra Directa, en la Pampa Húmeda. Encontrar una solución para evitar el ascenso de las napas es el principal desafío de la actual agricultura en la región.

BIBLIOGRAFIA CITADA

Bollatti, P. A., Andreucci, A. 2015. Análisis de datos de profundidad de napa freática y precipitaciones anuales de la EEA INTA Marcos Juárez.

Martini, E., Baigorri, H., 2002. Manejo del cultivo de soja en suelos con influencia de napa freática. Soja Actualización 2002. INTA Marcos Juárez, pp A-9-A-13.

Ray, J.D., and T.R.Sinclair.1998. The effect of pod size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress. J. Exp. Bot. 49:1381-1386.

Salado Navarro, L.R., Sinclair, T.R., Morandini, M. 2013. Estimation of soil evaporation during fallow seasons to assess water balances for no-till crop rotations. J. Agronomy Crop Sci., 199: 57-65.

Salado Navarro, L.R., Sinclair, T.R., 2009. Crop rotations in Argentina: Analysis of water balance and yield using crop models. Agricultural Systems, 102: 11-16.

Sinclair, T. R., Salado Navarro, L.R., Salas, G., Purcell, L.C., 2007. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. Agricultural Systems 94:47-477.

Sinclair, T. R., Salado Navarro, L.R., Morandi, E.N., Bodrero, M.L., Martignone, R.A. 1992. Soybean yield in Argentina in response to weather variation among cropping seasons. Field Crops Res. 30, 1-11.

Sinclair, T.R. 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. 1. Model development. Field Crops Res. 15:125-141.

Vallone, P. y otros. 2015. Ensayos Comparativos de Rendimiento de Maíz. Campaña 2014/15. Informe Técnico E.E.A. Marcos Juárez.
